ЕСТЕСТВЕННАЯ НАУКА В КОМИКСАХ

ФИЗИКА

«Гоник – единственный в своем роде».
Discover

ЗНАНИЙ МНОГО НЕ БЫВАЕТ!

ЛАРРИ ГОНИК

New York Times bestselling author

ЕСТЕСТВЕННАЯ НАУКА В КОМИКСАХ

ФИЗИКА

ЛАРРИ ГОНИК

АРТ ХАФФМАН

КоЛибри
МОСКВА

УДК 53
ББК 22.3
Г65

Larry Gonick and Arthur Huffman
THE CARTOON GUIDE TO PHYSICS

Перевод с английского Вадима Кадученко
Оформление обложки Владиславы Матвеевой

Перевод опубликован с согласия издательства HarperCollins Publishers

Гоник Л.
Г65 Физика. Естественная наука в комиксах / Ларри Гоник и Арт Хаффман ; пер. с англ. В. Кадученко. – 2-е изд., испр. – М. : КоЛибри, Азбука-Аттикус, 2016. – 224 с. : ил.

ISBN 978-5-389-08906-8

До того как начать говорить на языке формул подобно Фейнману и Ландау, нужно изучить азы. Эта книга в увлекательной форме знакомит с основными физическими явлениями и законами. Аристотель и Галилей, Ньютон и Максвелл, Эйнштейн и Фейнман – признанные гении человечества, которые внесли огромный вклад в развитие физики, и в этом уникальном пособии разъясняется, в чем он состоит. Здесь затрагивается широкий спектр тем: механика, электричество, теория относительности, квантовая электродинамика. Доступность в сочетании с высоким научным уровнем изложения гарантирует успех в изучении одной из самых интересных дисциплин, тесно связанной с другими сферами, и прежде всего с техникой.

УДК 53
ББК 22.3

ISBN 978-5-389-08906-8

© 1990 by Lawrence Gonick and Arthur Huffman
© Кадученко В.Д., перевод на русский язык, 2015
© Издание на русском языке, оформление.
ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус», 2016
КоЛибри®

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. МЕХАНИКА

Глава 1. Движение 9

Глава 2. Яблоко и Луна 24

Глава 3. Пуля и параболическое движение 39

Глава 4. Движение спутников и невесомость 43

Глава 5. Другие орбиты 48

Глава 6. Третий закон Ньютона 53

Глава 7. Подробнее о силах 59

Глава 8. Импульс и импульс силы 70

Глава 9. Энергия 79

Глава 10. Столкновения 89

Глава 11. Вращение 96

ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Глава 12. Заряд 111

Глава 13. Электрические поля 123

Глава 14. Конденсаторы 129

Глава 15. Электрический ток .134

Глава 16. Последовательное и параллельное соединение 148

Глава 17. Магнитные поля 155

Глава 18. Постоянные магниты 166

Глава 19. Закон электромагнитной индукции Фарадея 170

Глава 20. Относительность 175

Глава 21. Катушки индуктивности 183

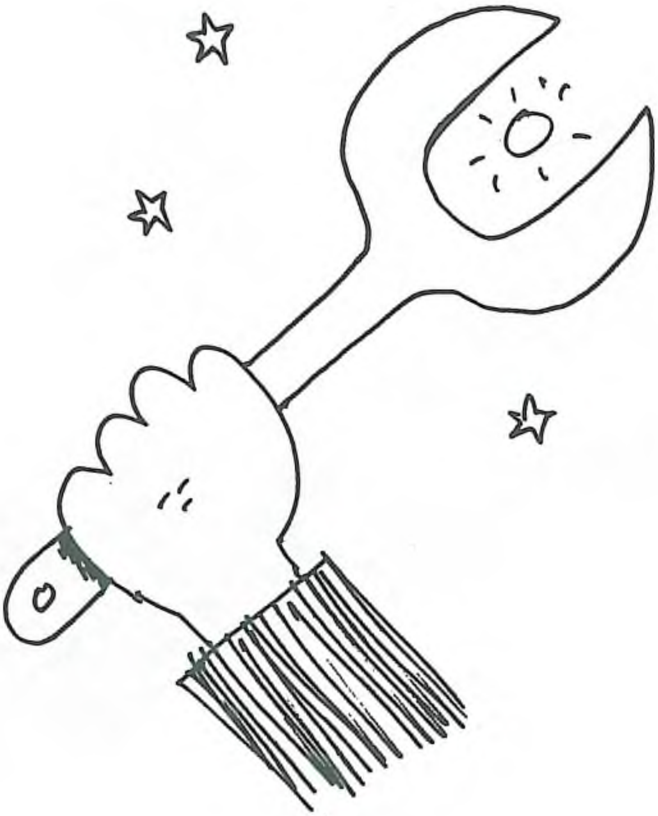
Глава 22. Постоянный и переменный ток 186

Глава 23. Уравнения Максвелла и свет 195

Глава 24. Квантовая электродинамика 201

Указатель 215

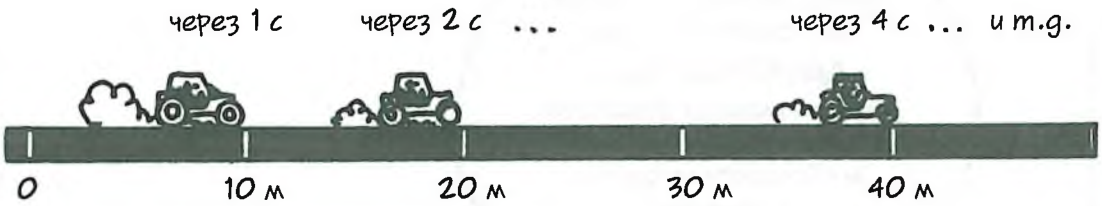
• ЧАСТЬ ПЕРВАЯ •
МЕХАНИКА



ГЛАВА 1
ДВИЖЕНИЕ

Мой друг, космонавт **РИНГО**, едет на машине по этой трассе. Машина движется с постоянной скоростью, значит, за равные промежутки времени она проезжает одинаковый путь и можно записать:

$$d = v \cdot t$$



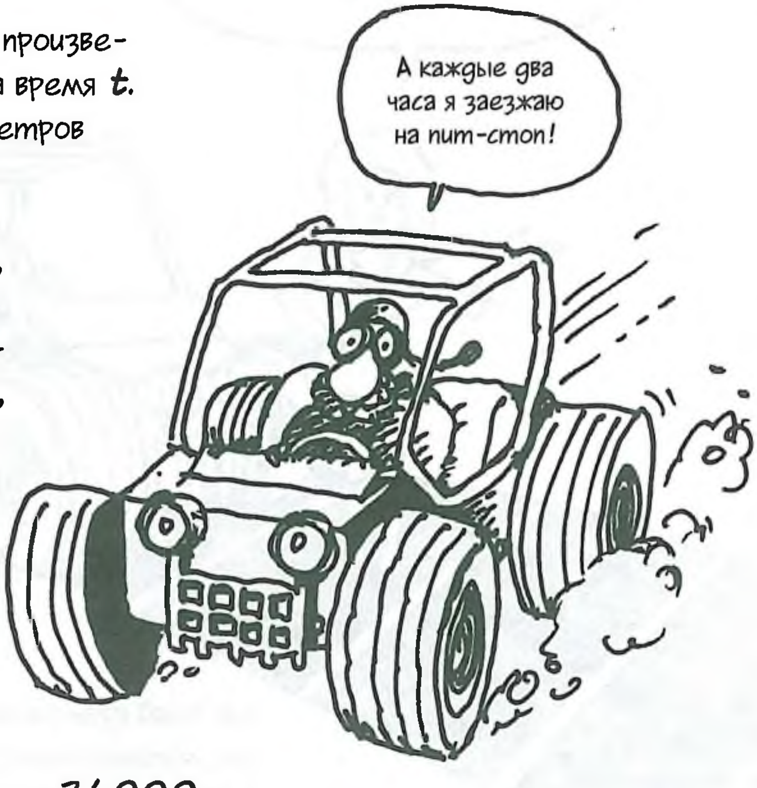
Расстояние d равно произведению скорости v на время t. Скорость равна 10 метров в секунду, значит, за 1 секунду Ринго проедет 10 метров, за 2 секунды — 20 метров, за 3 секунды — 30 метров, за минуту — 600 метров...

⋮

А за 1 час (3600 с) он проедет

$$3600\ с \times 10\ м/с = 36\,000\ м =$$

$$= 36\ км$$



В обычной жизни любая машина постоянно ускоряется и замедляется, то есть ее скорость непостоянна. Как же быть с уравнением $d = v \cdot t$? Какое значение v выбрать, если оно все время меняется?

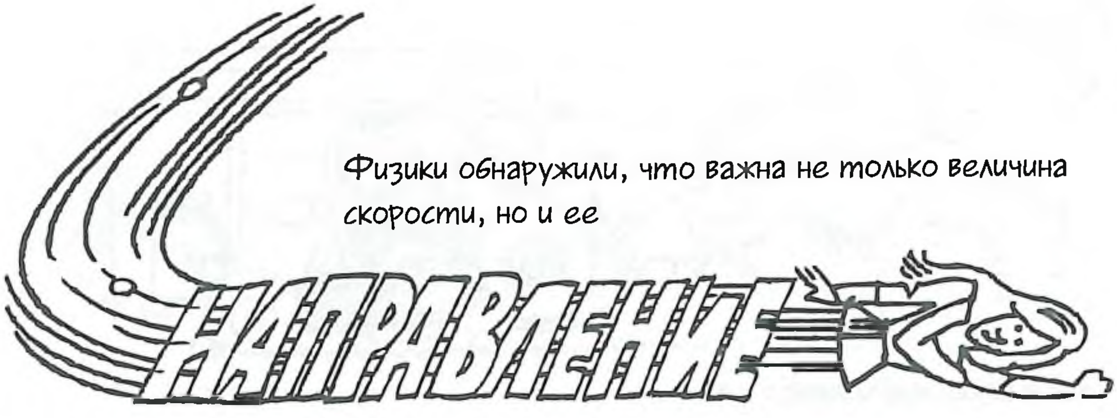
Можно выразить v из этого уравнения. Получится

$v = d/t$, значит,

$$v = \frac{\text{конечные показания одометра} - \text{начальные показания одометра}}{\text{время в пути}}$$

Так определяется **СРЕДНЯЯ** скорость в пути. Ученые древности лишь после долгих раздумий поняли, что у предметов есть и **МГНОВЕННАЯ** скорость — скорость в конкретный момент времени. Именно эту скорость и показывает спидометр.

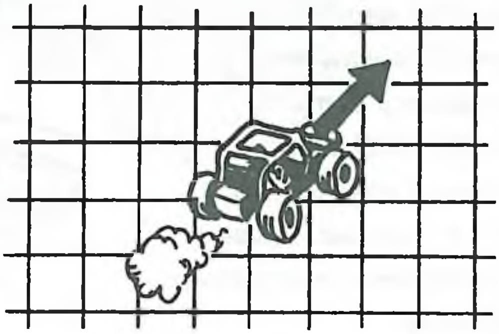
Физики обнаружили, что важна не только величина скорости, но и ее



Если Ринго движется в отрицательном направлении (например, развернулся или едет задним ходом), то его скорость **ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ**.

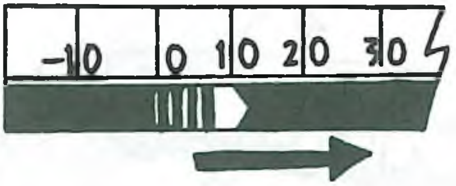
Направленную скорость можно представить как стрелку, указывающую направление движения. Длина этой стрелки будет пропорциональна величине скорости.

Скорость Ринго можно обозначать стрелкой и в общем случае — например, когда он едет со скоростью $v = 32$ м/с с азимутом 28°.

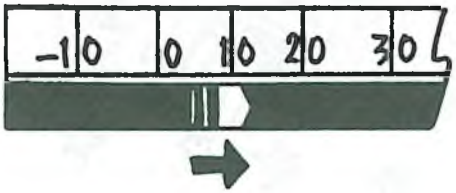


Давай еще разок прокатимся с Ринго. У него в машине линейный «скоростемер», который показывает отрицательные числа, когда машина едет назад. Значит, ускорение — всего лишь скорость стрелки «скоростемера»!*

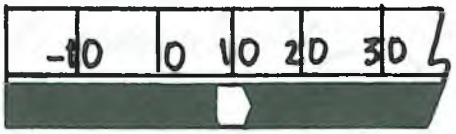
* Нужно использовать те же единицы, что указаны на шкале «скоростемера».



Если скорость меняется быстро, ускорение большое.

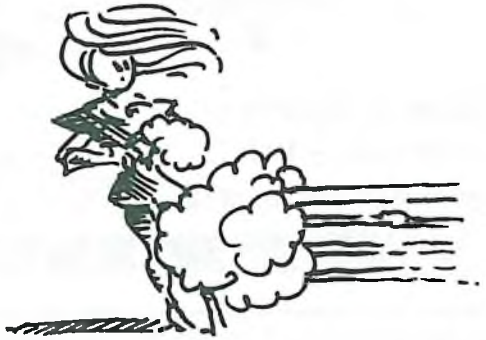


Если скорость меняется медленно, ускорение маленькое.



Если Ринго едет с постоянной скоростью, ускорение равно нулю.

Теперь представим, что Ринго плавно разгоняется от 0 до 50 км/ч за 5 с. Стрелка спидометра движется с **ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ**, значит, **УСКОРЕНИЕ ПОСТОЯННОЕ**. Вычислим его:



$$a = \frac{\text{конечная скорость} - \text{начальная скорость}}{\text{время}} = \frac{50\ \text{км/ч}}{5\ \text{с}} =$$

$$= \frac{50\ \text{км/ч}}{5\ \text{с}} \cdot \left(\frac{1\ \text{ч}}{3600\ \text{с}}\right)\left(\frac{1000\ \text{м}}{1\ \text{км}}\right) = 2{,}78\ \text{м/с}^2$$

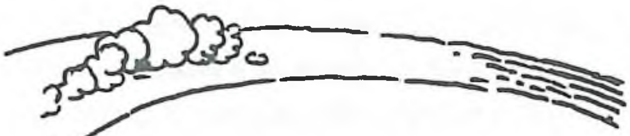
Оба этих множителя равны 1. Они нужны для того, чтобы перевести часы в секунды, а километры — в метры.

Обрати внимание: ускорение измеряется в м/с^2 — в метрах в секунду в квадрате!

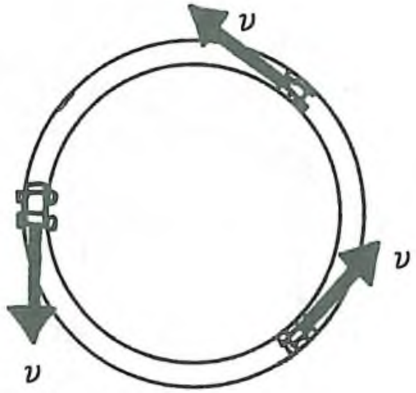
А что еще произошло, когда Ринго разгонялся? При ускорении вперед его вдавливало в кресло.
Значит,
С ускорением связана сила!
Теперь Ринго тормозит.
Хм, где же тормоз?
Машина замедляется, и Ринго чувствует силу, которая толкает его вперед.
При торможении, или ЗАМЕДЛЕНИИ, стрелка спидометра движется влево — скорость стрелки становится отрицательной.
0
10
20
30
Значит, когда машина тормозит, ее ускорение отрицательное.
Вр-вр-вр
!

Замечаешь, что ускорение и сила, которую ты чувствуешь, направлены в противоположные стороны?
– Я чувствую столько всего...
Если машина едет с положительной скоростью и тормозит (или, наоборот, разгоняется в обратную сторону), то ускорение будет отрицательным.
Стрелка спидометра в любом случае движется влево!
Силы, связанные с ускорением, помогут нам изготовить индикатор ускорения – АКСЕЛЕРОМЕТР. Это просто груз, подвешенный на раме машины.
Когда машина ускоряется, груз отклоняется назад на некоторый угол от вертикали.
При отрицательном ускорении груз отклоняется вперед.
Груз движется в направлении, обратном направлению ускорения. Угол отклонения указывает величину ускорения.
A
a = g · tgA
Что такое g?
Скоро узнаешь!

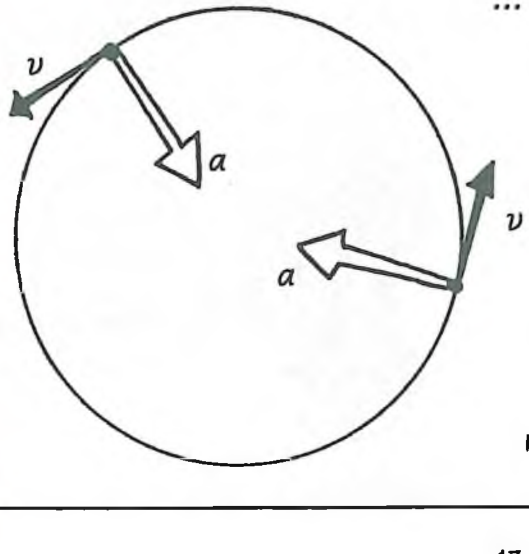
Вот еще один пример. Ринго едет по кругу с постоянной скоростью 20 км/ч.



Показания спидометра не меняются, но Ринго чувствует, как сила выталкивает его из поворота, а акселерометр отклоняется наружу.



Здесь ускорение уже нельзя определить через показания спидометра. Величина скорости не меняется — меняется ее **НАПРАВЛЕНИЕ...**



... и ускорение оказывается **ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО** направлению движения. Оно направлено внутрь круга, а сила, которую чувствует Ринго, — наружу. Акселерометр указывает ускорение верно. Вывод: когда предмет движется по кругу с постоянной скоростью, его ускорение направлено **В ЦЕНТР КРУГА**.

Ускорение — одно из базовых понятий физики, пусть и понять его непросто. У большинства предметов в реальном мире величина и направление скорости постоянно меняются — другими словами, эти предметы ускоряются!

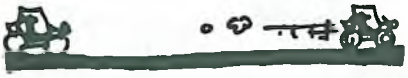
Скорость определяется простым уравнением

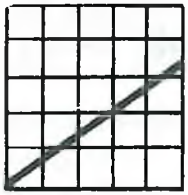
$$v = d/t.$$

Скорость — мера изменения расстояния, а ускорение — мера изменения скорости. Ускорение тоже может меняться!

В начальной физике обычно рассматривается движение **С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ.**

Ты начинаешь движение из состояния покоя, ускорение постоянно и равно a, время в пути — t. Сколько ты проедешь за это время?





Начальная скорость равна нулю и равномерно возрастает до $v = at$ за время t. Значит, **СРЕДНЯЯ** скорость равна:

$$v_{средняя} = \frac{0 + at}{2} = \frac{1}{2}at$$

Тогда пройденный путь d равен средней скорости, умноженной на время t, то есть

$$d = \frac{1}{2}at \cdot t$$

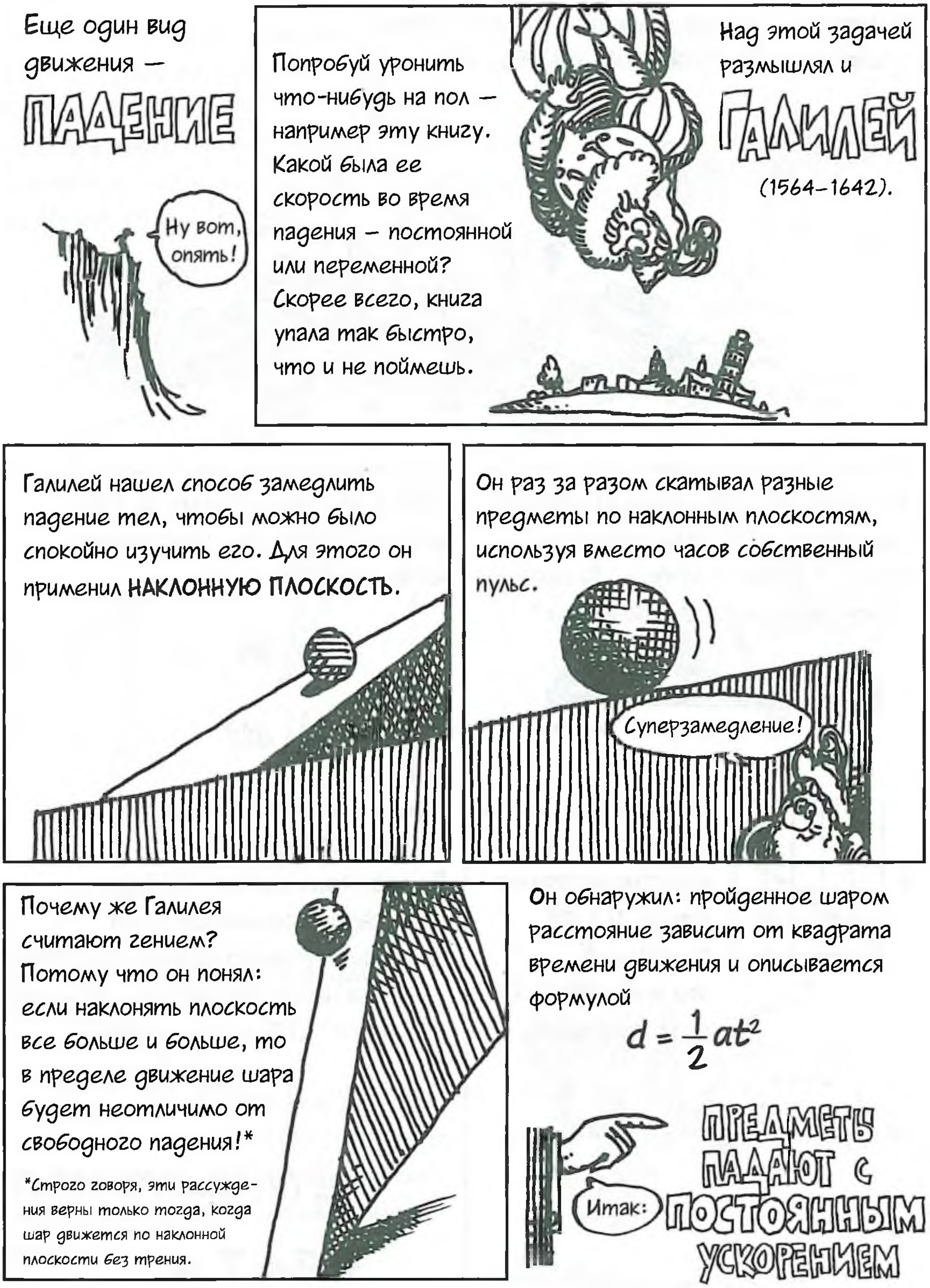
$$d = \frac{1}{2}at^2$$

Пусть Ринго разогнался с 0 до 50 км/ч за 5 с. Посмотрим, сколько он проехал. Эта задача решается в два действия: сначала найдем ускорение (мы уже нашли его на стр. 14 — оно равно $a = 2{,}78$ м/с^2), значит,

$$d = \frac{1}{2}at^2 =$$

$$= \frac{1}{2}(2{,}78 \text{ м/с}^2) \cdot (5\text{с})^2 =$$

$$= 34{,}7 \text{ м}$$


Еще один вид движения —
ПАДЕНИЕ
Ну вот, опять!
Попробуй уронить что-нибудь на пол — например эту книгу. Какой была ее скорость во время падения – постоянной или переменной? Скорее всего, книга упала так быстро, что и не поймешь.
Над этой задачей размышлял и
ГАЛИЛЕЙ
(1564–1642).
Галилей нашел способ замедлить падение тел, чтобы можно было спокойно изучить его. Для этого он применил НАКЛОННУЮ ПЛОСКОСТЬ.
Он раз за разом скатывал разные предметы по наклонным плоскостям, используя вместо часов собственный пульс.
Суперзамедление!
Почему же Галилея считают гением? Потому что он понял: если наклонять плоскость все больше и больше, то в пределе движение шара будет неотличимо от свободного падения!*
*Строго говоря, эти рассуждения верны только тогда, когда шар движется по наклонной плоскости без трения.
Он обнаружил: пройденное шаром расстояние зависит от квадрата времени движения и описывается формулой
$d = \frac{1}{2}at^2$
Итак:
ПРЕДМЕТЫ ПАДАЮТ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ

А еще Галилей хотел понять, как скорость падения предметов зависит от **МАССЫ**. Казалось бы, все знают, что кирпич падает быстрее, чем перо.

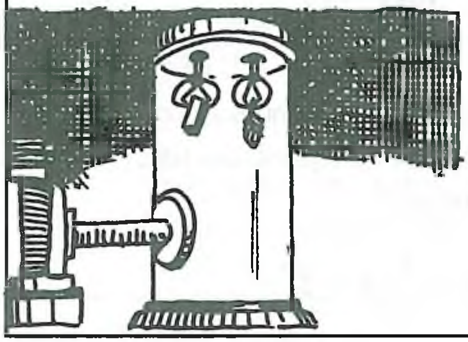
Но эксперименты Галилея принесли неожиданный результат: если пренебречь сопротивлением воздуха, то

ВСЕ ПРЕДМЕТЫ ПАДАЮТ С ОДИНАКОВЫМ УСКОРЕНИЕМ

независимо от массы.

Перо падает медленно из-за большого сопротивления воздуха. Но в вакууме, например на Луне, перо упадет так же быстро, как кирпич.

Этот эксперимент можно повторить на Земле — внутри сосуда, из которого выкачан воздух.



После тщательных измерений мы нашли это ускорение: у поверхности Земли все предметы падают с постоянным ускорением g, равным

$$9{,}8\ м/с^2$$

(без учета сопротивления воздуха).

Между прочим, **ЭЙНШТЕЙН** (1879–1955) показал: так как все предметы движутся в поле тяготения одинаково, тяготение должно быть свойством **ПРОСТРАНСТВА** и **ВРЕМЕНИ**, а не предметов.

Чтобы сделать разговор более предметным, сбросим какой-нибудь предмет с крыши.

Предмет будет двигаться с постоянным ускорением g. Значит, его скорость будет возрастать пропорционально времени:

$$v = g \cdot t$$

Через 1 секунду она будет равна

$9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 1\ \text{с} = 9{,}8\ \text{м/с}$

Через 2 секунды она будет равна

$9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 2\ \text{с} = 19{,}6\ \text{м/с}$

и так далее.

А сколько пролетит предмет за время t? Применим нашу формулу

$$d = \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

За 1 секунду он пролетит

$\frac{1}{2} \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot (1\ \text{с})^2 =$

$= 4{,}9\ \text{м}$

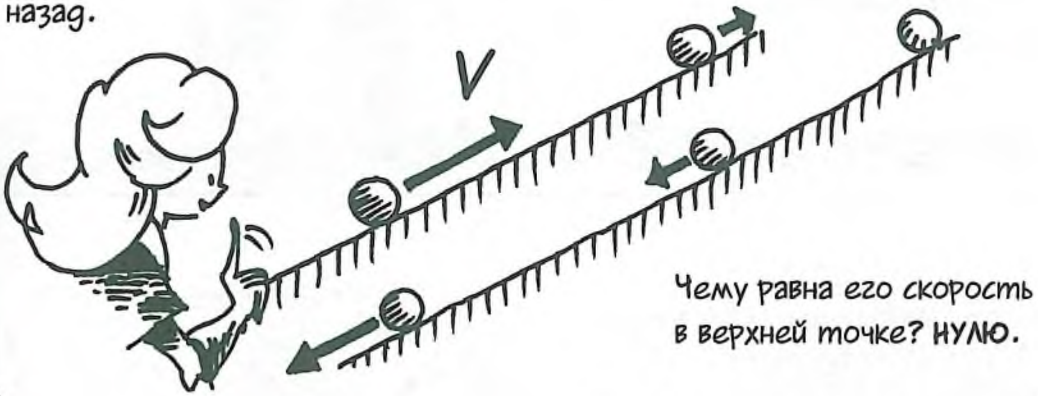
За 2 секунды он пролетит

$\frac{1}{2} \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot (2\ \text{с})^2 =$

$= 19{,}6\ \text{м}$

t	v	d
0	0	0
0,5	4,9 м/с	1,3 м
1	9,8 м/с	4,9 м
2	19,6 м/с	19,6 м
3	29,4 м/с	44,1 м
4	39,2 м/с	78,4 м

Теперь запустим шар вверх по галилеевскому «устройству для ослабления тяготения». Сначала он будет катиться быстро, потом замедлится, на миг остановится, а затем все быстрее и быстрее покатится назад.



Чему равна его скорость в верхней точке? **НУЛЮ.**

А каким будет **УСКОРЕНИЕ** шара в верхней точке? Ненулевым! Ускорение во время движения постоянно. Именно под действием этого ускорения шар замедляется, когда катится вверх, а потом ускоряется, когда катится вниз. Так и ускорение камня, брошенного вверх, всегда равно g и направлено **ВНИЗ**.

ГЛАВА 2

ЯБЛОКО И ЛУНА

Чтобы понять движение Луны и других предметов вокруг нас, попробуем ответить на вопрос: что происходит с предметами, когда на них не действует **НИКАКАЯ** сила?

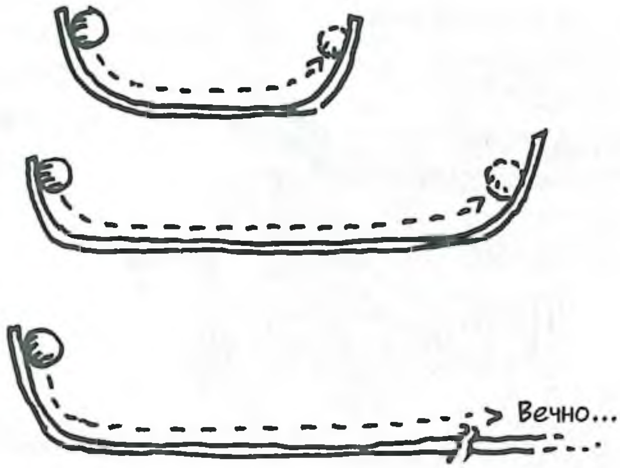
Много веков физики жили в тени **АРИСТОТЕЛЯ** (384–322 до н.э.). Он считал, что **КРУГОВОЕ ДВИЖЕНИЕ** — это «естественное» движение **НЕБЕСНЫХ** тел (Луны и звезд), а **ЗЕМНЫЕ** тела (яблоки, камни и даже ты!) «естественным образом» стремятся **УПАСТЬ**.

Заметь: раз Луна движется по кругу, ее движение можно объяснить, не прибегая к понятию силы тяготения.
Это естественно!
Земные тела, по мнению Аристотеля, после падения находятся в покое, пока их не оттолкнет какая-нибудь сила.
Он ПОКА не движется!
Интуиция подсказывает, что он прав! Кажется, что для поддержания движения нужна сила, точно так же, как машине нужен мотор.
РРРР
Если заглушить мотор, то машина... постепенно... остановится...
хрр кляц
бип-бип
тр-тр-тр
Гениальный Галилей первым понял: для поддержания
Так-то!
РАВНОМЕРНОГО ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ НИКАКАЯ СИЛА не нужна.

Блестящая идея Галилея была такова: силы **ИЗМЕНЯЮТ ДВИЖЕНИЕ** предметов. Без действия сил предметы двигались бы по прямой вечно — их останавливает лишь **СИЛА ТРЕНИЯ.**

Убедиться в этом нам поможет простое приспособление, сделанное из резинового коврика.

На другой стороне коврика мяч закатывается на ту же самую высоту. Не будь другой стороны, он катился бы вечно, если бы не сила трения.



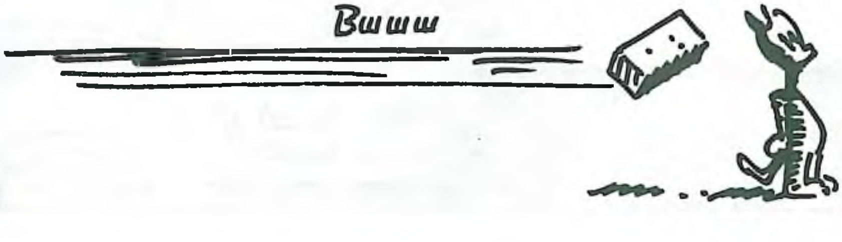
Исаак **НЬЮТОН** (1642–1727) выразил идею Галилея в **ПЕРВОМ ЗАКОНЕ НЬЮТОНА:**

Тело, находящееся в покое, стремится остаться в покое.

Тело в движении стремится продолжить движение по прямой с постоянной скоростью.

(А еще он сказал: «Я видел дальше других только потому, что стоял на плечах гигантов». Разумеется, он имел в виду Галилея.)

В терминах из первой главы этот закон звучит так: если на тело не действуют силы, оно движется с **ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ.**



Свойство тел, которое заставляет их «подчиняться» первому закону Ньютона, называется **ИНЕРЦИЕЙ**. Инерция — это сопротивление изменениям движения.

Величина инерции тела выражается его **МАССОЙ**. Инерция массивных тел больше, значит, чтобы сдвинуть их с места, нужна бо́льшая сила.

Как мы уже говорили, когда машина Ринго ускоряется, он чувствует действие силы.

Откуда берется эта сила? Это машина действует на Ринго, чтобы преодолеть его инерцию и придать ему ускорение.

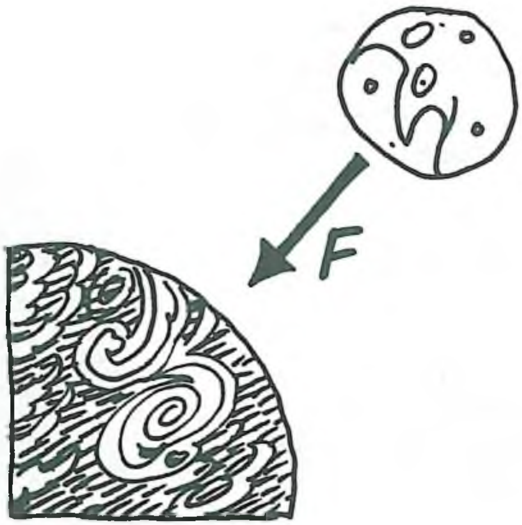
Ньютон сделал вывод:

Эту связь между силой, массой и ускорением Ньютон выразил в математическом виде в своем **ВТОРОМ ЗАКОНЕ:**

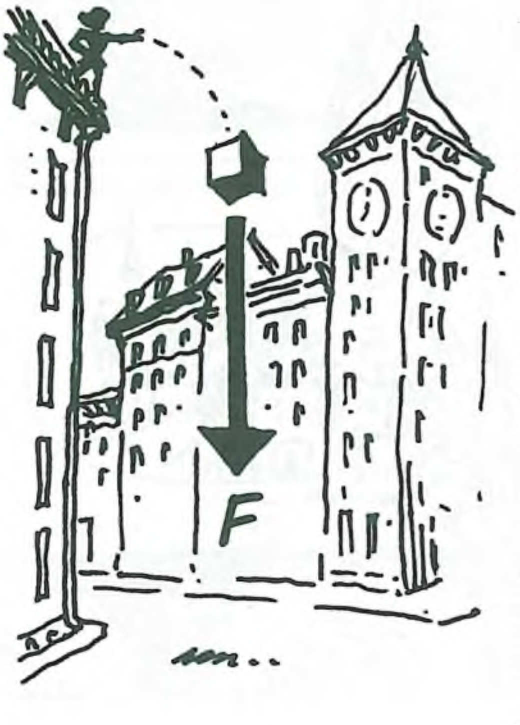
$$F = m \cdot a$$

Чем больше сила, действующая на тело, тем больше ускорение. Но чем больше масса тела, тем больше оно сопротивляется ускорению.

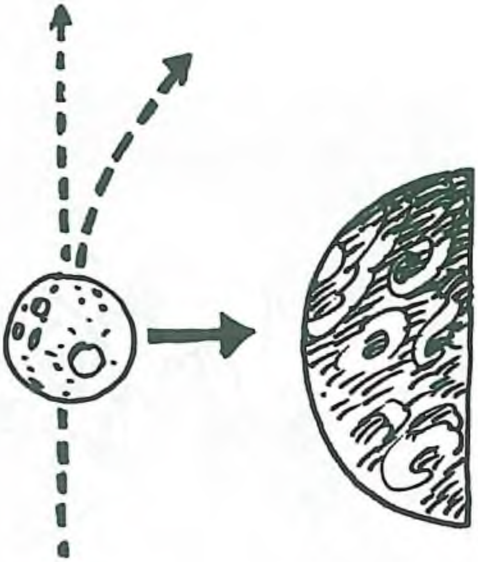
Теперь давай еще раз посмотрим на Луну. Она движется вокруг Земли почти по идеальной окружности. Мы показали, что тела, которые движутся по окружности, ускоряются. Значит, на Луну действует сила: **ЭТО ЗЕМЛЯ ПРИТЯГИВАЕТ ЛУНУ К СЕБЕ.**



Мы знаем, что Земля притягивает к себе все предметы и придает им ускорение, направленное вниз.



Эта же сила, **СИЛА ТЯГОТЕНИЯ**, действует и на Луну. Если бы тяготения не было, то Луна двигалась бы вдоль прямой.



Не будь тяготения, яблоко, выпущенное из рук, не упало бы, а повисло бы в воздухе в состоянии покоя (в «естественном» состоянии).

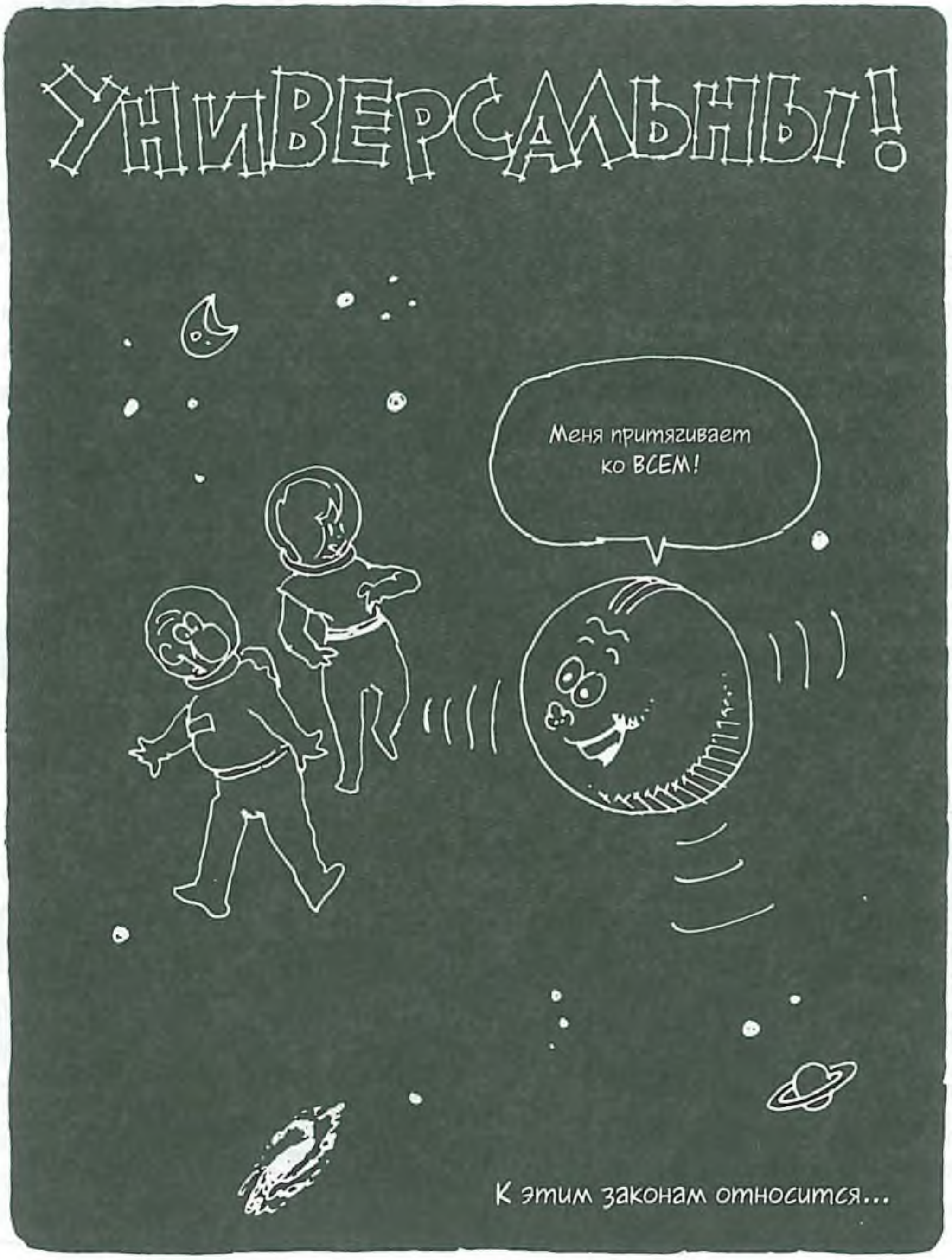
Если бы не тяготение и другие силы, Луна двигалась бы вдоль прямой с постоянной скоростью, но под действием тяготения она ускоряется по направлению к Земле. **ЛУНА ПАДАЕТ** относительно «естественной» прямолинейной траектории, которую описывает первый закон Ньютона.

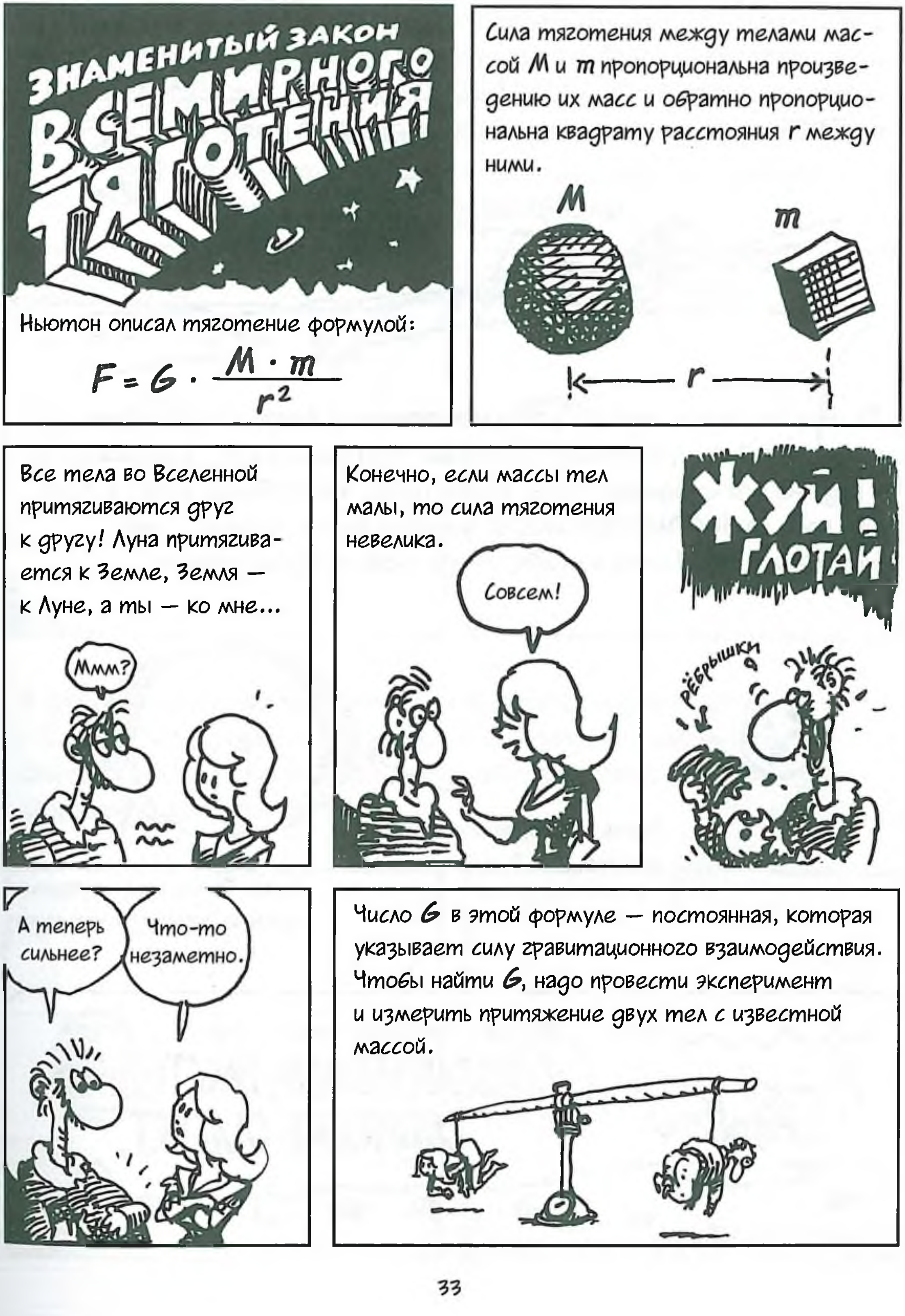
За одну секунду Луна падает примерно на 1 мм относительно прямолинейной траектории.

За одну секунду яблоко у поверхности Земли падает на 4,9 м.

Луна падает не так быстро, как яблоко, потому что вдали от Земли сила тяготения меньше.

Давай ненадолго остановимся и оценим всю важность открытий Ньютона. Движение яблока и Луны описывают одни и те же законы, а небесные тела ведут себя так же, как и земные, значит, законы Ньютона

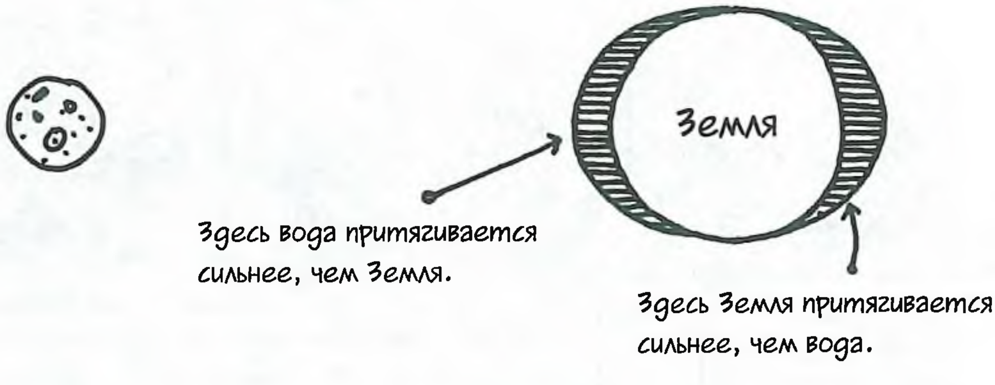




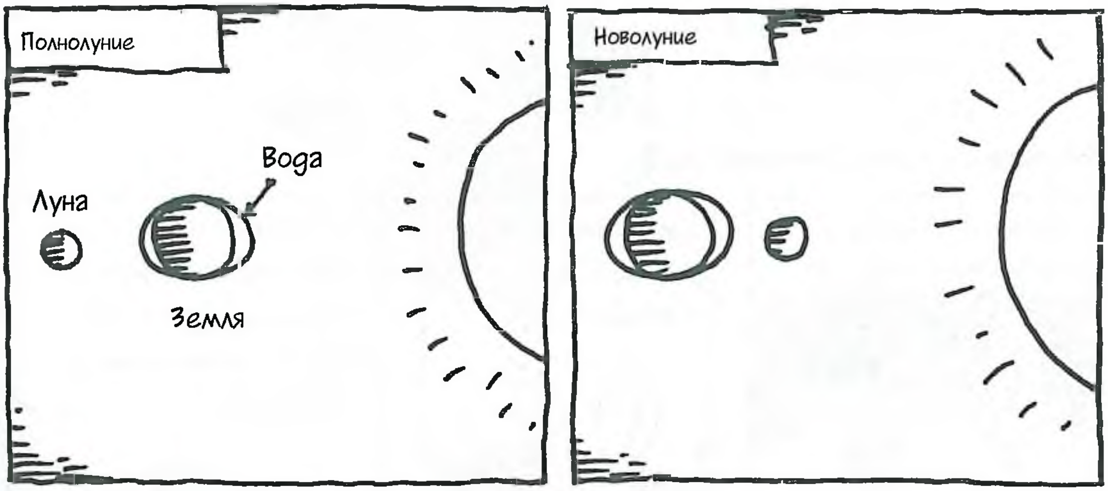
Знаменитый закон всемирного тяготения
Ньютон описал тяготение формулой:
$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$
Сила тяготения между телами массой M и m пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними.
M
m
r
Все тела во Вселенной притягиваются друг к другу! Луна притягивается к Земле, Земля — к Луне, а ты — ко мне...
Ммм?
Конечно, если массы тел малы, то сила тяготения невелика.
Совсем!
Жуй! Глотай
рёбрышки
А теперь сильнее?
Что-то незаметно.
Число G в этой формуле — постоянная, которая указывает силу гравитационного взаимодействия. Чтобы найти G, надо провести эксперимент и измерить притяжение двух тел с известной массой.

С увеличением расстояния тяготение ослабевает: как мы показали, Луна «падает» медленнее, чем яблоко у поверхности Земли. Еще одно проявление этого **ЗАКОНА ОБРАТНЫХ КВАДРАТОВ** — это **ПРИЛИВЫ** и **ОТЛИВЫ** воды в океане, происходящие дважды в день.

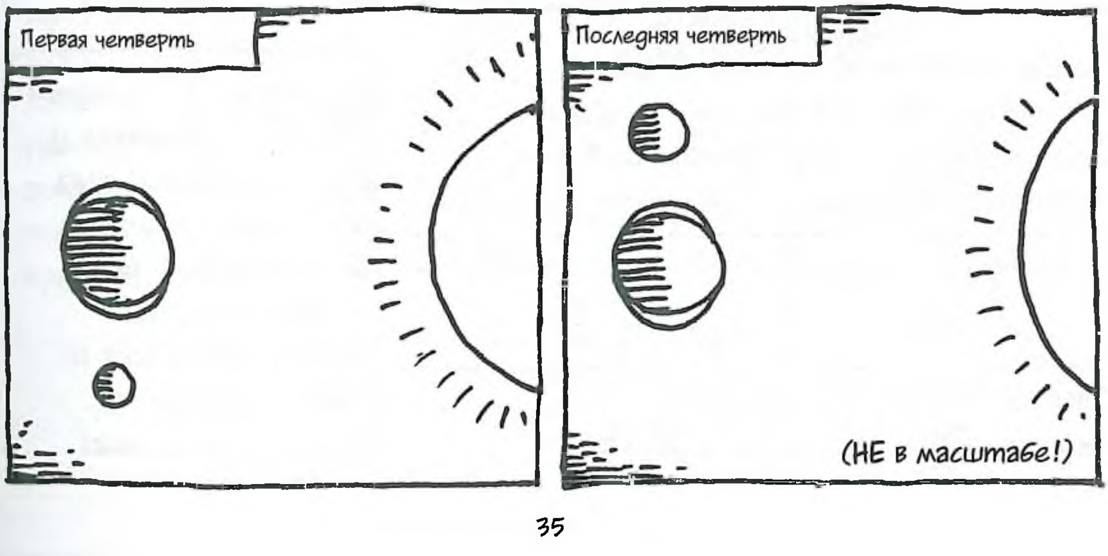
Та сторона Земли, что расположена прямо под Луной, ближе к Луне, чем центр Земли, поэтому тяготение Луны действует на нее сильнее, и вода на ней «поднимается». Кроме того, центр Земли ближе к Луне, чем вода на **ПРОТИВОПОЛОЖНОЙ** стороне Земли, поэтому Луна «оттягивает» Землю на себя, и вода снова «поднимается»!



Солнце тоже вызывает приливы, но они слабее, потому что Солнце дальше от Земли, чем Луна. Каждый месяц в полнолуние и новолуние Солнце, Луна и Земля находятся на одной линии, поэтому приливы и отливы в эти дни особенно сильны. Такие приливы наблюдаются дважды в месяц и называются **СИЗИГИЙНЫМИ**.



В первой и последней четверти Луна находится под прямым углом к Солнцу. Тяготение Луны частично компенсируется тяготением Солнца, поэтому прилив будет слабее обычного. Такие приливы называются **КВАДРАТУРНЫМИ**.



Теперь давай подумаем о том, как тяготение влияет на тела у поверхности Земли, например на тебя. Сила тяготения, действующая на тебя, — это твой **ВЕС**.

Как можно уменьшить свой вес?

Каким будет твое ускорение, если ты спрыгнешь с крыши? Заметь, теперь мы можем выразить силу притяжения Земли, которая действует на тебя, двумя способами:

Из второго закона Ньютона:	Из закона всемирного тяготения:
$F = mg$	$F = G \cdot \dfrac{Mm}{r^2}$

Приравняем выражения и получим:

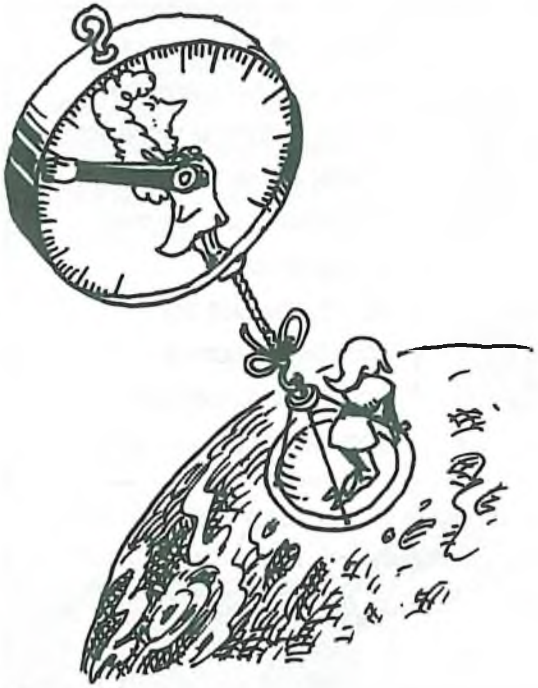
$mg = G \cdot \dfrac{Mm}{r^2}$, отсюда $g = G \cdot \dfrac{M}{r^2}$

В последней формуле g выражено через фундаментальную постоянную G, массу и радиус Земли. Твоя масса m сокращается, и g не зависит от нее!

Сила $W = mg$,
с которой Земля
действует на тебя,
показывает, чем
отличаются **ВЕС**
и **МАССА**.

Масса m обозначает
количество материи
в предмете и указывает:
1) как сильно предмет
притягивает другие
предметы;
2) как сильно он
сопротивляется
ускорению, какова
его инерция.

Вес W указывает,
какая сила тяготения
действует на предмет.
Вес зависит от того,
где ты находишься:
в открытом космосе
твой вес может
равняться нулю,
а масса всегда
остается
прежней!



Вес и масса даже измеряются в разных единицах. В метрической системе масса измеряется в **КИЛОГРАММАХ**, а вес — в **НЬЮТОНАХ**. Человек массой 50 кг имеет вес

$$W = mg =$$

$$= 50 \text{ кг} \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2 =$$

$$= 490 \text{ ньютонов}$$

Говорить, что предмет «весит» 50 килограммов, некорректно. Вес выражается в единицах измерения силы, то есть в ньютонах. Непонятно? Тогда вот еще пример: в британской системе единица измерения силы называется

ФУНТ,

а единица измерения массы –

СЛАГ («улитка»).

Человек весом 715 ньютонов имеет массу

$$m = \frac{W}{g} = \frac{715 \text{ ньютонов}}{9{,}8 \text{ м/с}^2} = 73 \text{ кг, или}$$

5 слагов

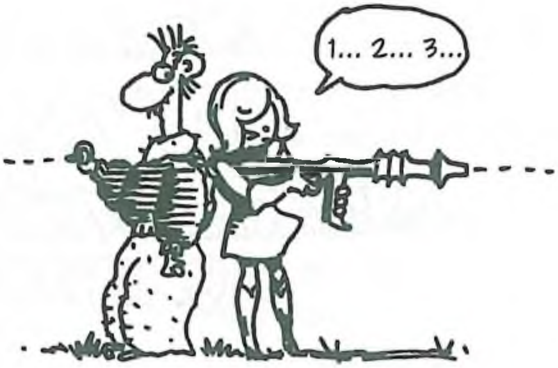
ГЛАВА 3

ПУЛЯ И ПАРАБОЛИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

В предыдущих главах мы взвешивали и роняли предметы.

Чтобы увидеть параболическое движение, достаточно столкнуть машину с обрыва или выстрелить из ружья в горизонтальном направлении. Главное при изучении такого движения — понять, что сила тяготения действует только **ПО ВЕРТИКАЛИ** и влияет только на **ВЕРТИКАЛЬНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ** скорости.

Это наблюдение помогает мгновенно решить известную задачу: если Ринго уронит пулю в тот же самый момент, когда я выстрелю из ружья горизонтально, то чья пуля упадет на землю первой? (Начальная высота обеих пуль одинакова.)



Пули упадут на землю одновременно, потому что они **ПАДАЮТ С ОДИНАКОВОЙ СКОРОСТЬЮ**. Горизонтальное движение не влияет на вертикальное!

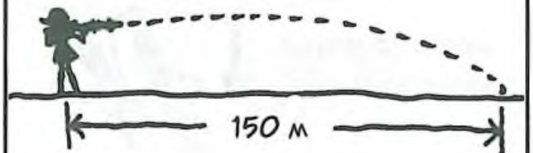
Пример. Я выстрелил из ружья с плеча, то есть с высоты 1,225 м. Эта высота равна

$$d = \frac{1}{2} g t^2, \text{ поэтому}$$

$$1{,}225 \text{ м} = \frac{1}{2} \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2 \cdot t^2$$

$$t = \sqrt{1\frac{c^2}{4}} = \frac{1}{2}c$$

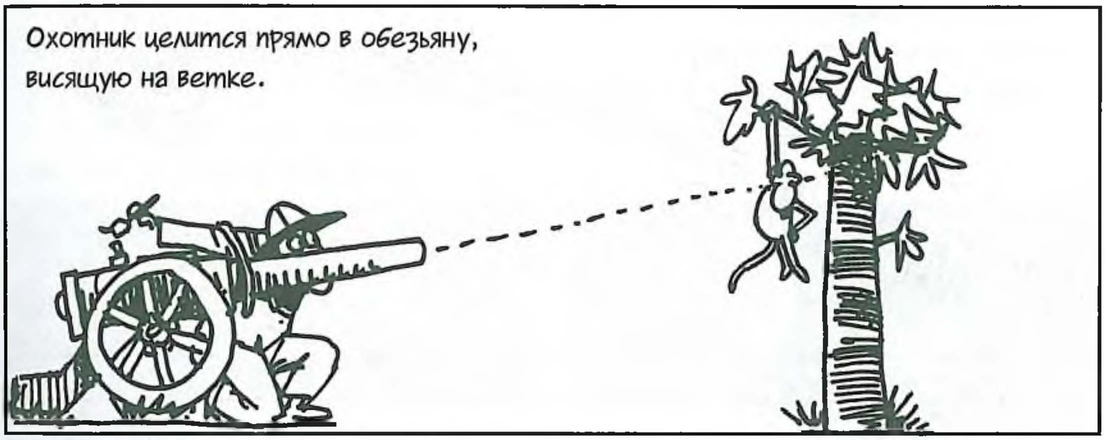
Если горизонтальная скорость пули равна 300 м/с, то за $\frac{1}{2}$ секунды она пролетит 150 м.



Следующий вопрос: что произойдет, если направить ружье вверх под углом?

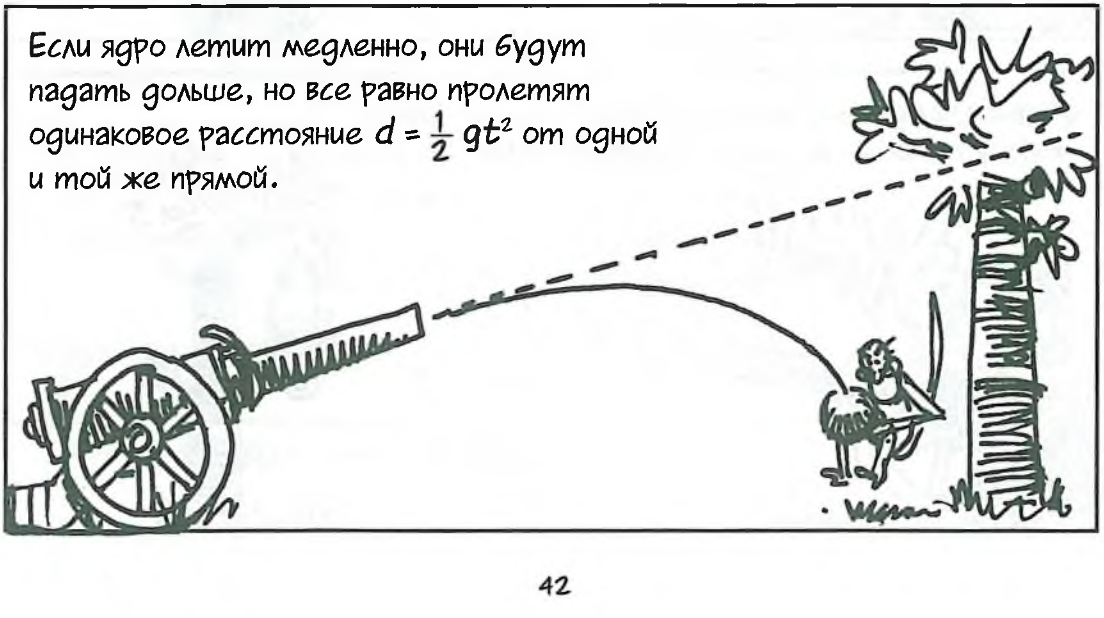
Если тяготения нет, то пуля будет бесконечно лететь вдоль прямой (по первому закону Ньютона). Если тяготение есть, то пуля будет ПАДАТЬ относительно этой прямой!
Ускорение
g

Проведем мысленный эксперимент под названием
„ОХОТНИК И ОБЕЗЬЯНА..“
Долой эксперименты над животными!


Охотник целится прямо в обезьяну, висящую на ветке.

Обезьяна разжимает лапу в тот самый момент, когда охотник стреляет из пушки. Что произойдет?
БУММ!

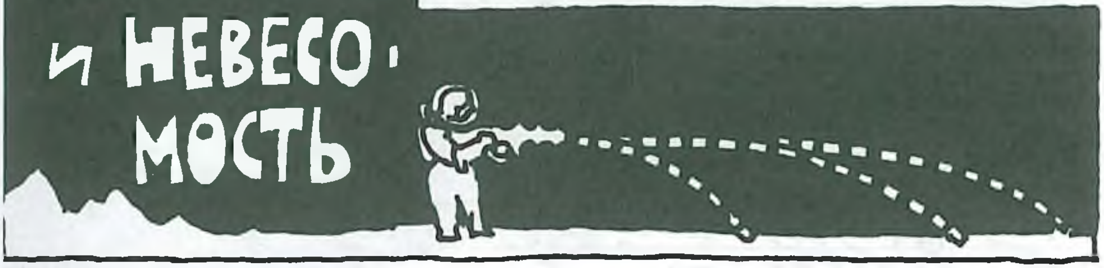
Бедная обезьяна! Она не понимает, что вертикальное и горизонтальное движение независимы! Но ты-то понимаешь, что ядро обязательно попадет в обезьяну.



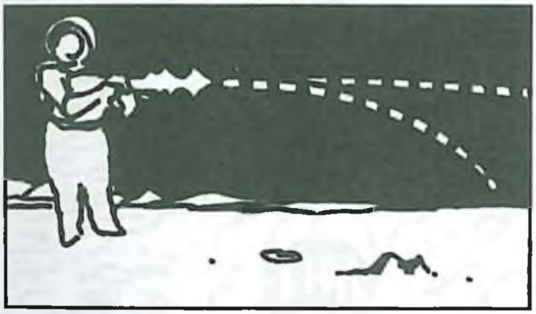
• Глава 4 •

Движение спутников и невесомость

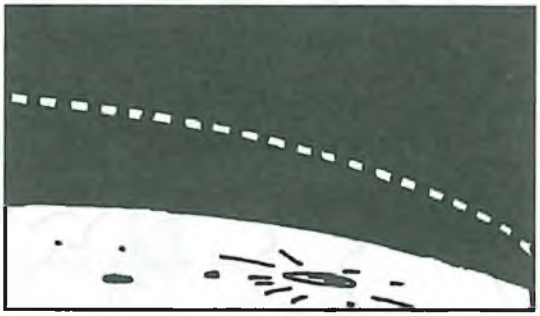
Теперь мы на Луне, где нет сопротивления воздуха. Я стреляю из ружья по горизонтали, начальная скорость пуль с каждым выстрелом все больше. Все пули упадут на Землю одновременно, потому что горизонтальное движение не влияет на скорость падения. Однако чем больше скорость пули, тем дальше она улетит.



Высота ружья над поверхностью — 1,225 м. На Земле пуля упадет на поверхность через $\frac{1}{2}$ секунды, а на Луне — через 1,2 секунды, потому что здесь тяготение слабее.



Если пули летят далеко, то становится заметно, что Луна не плоская, а круглая! Поверхность Луны будет изгибаться и удаляться от пули.

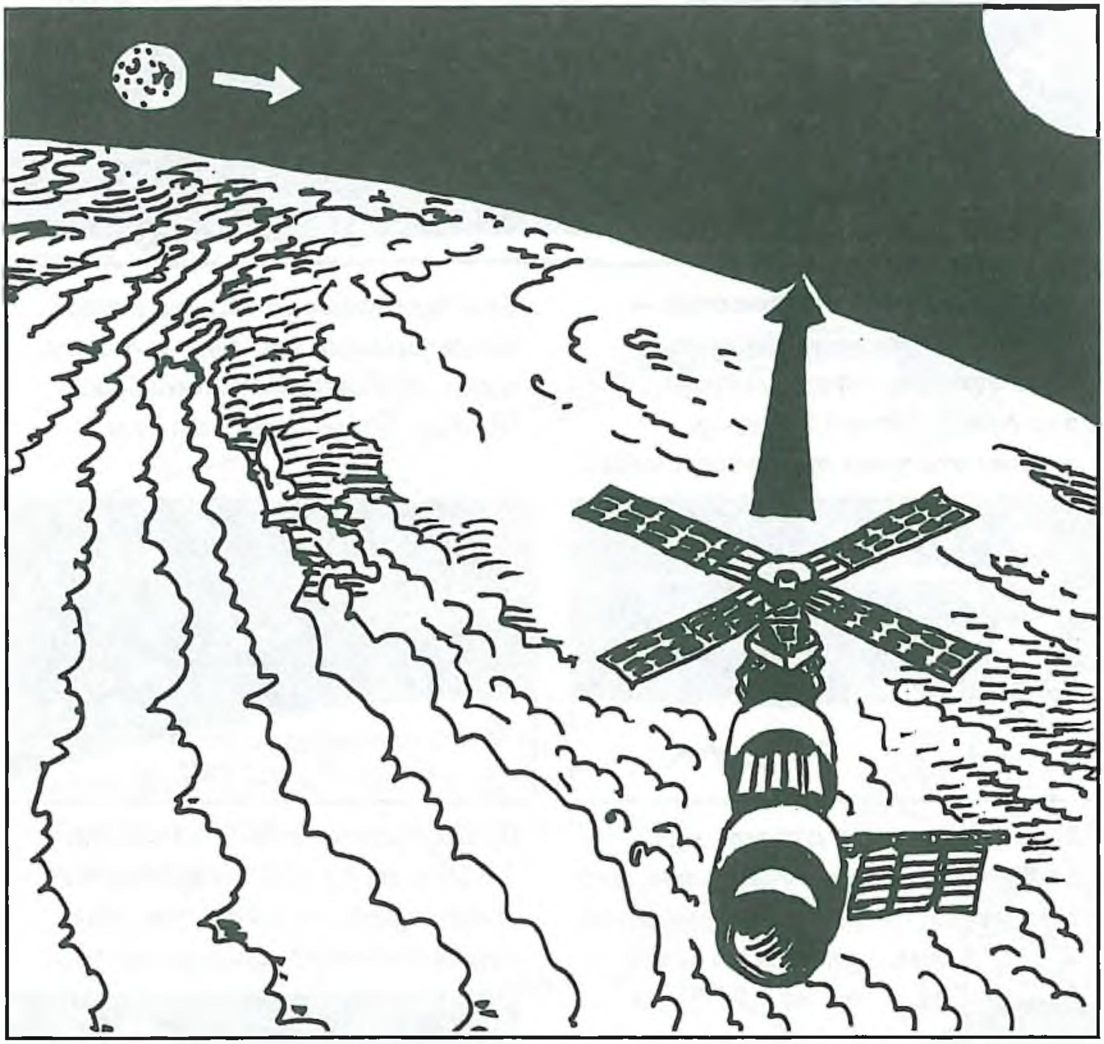


Будем увеличивать скорость пули. В какой-то момент получится так, что пуля упадет на 1,225 м, а поверхность Луны удалится от нее на те же 1,225 м, и пуля останется на **ПРЕЖНЕМ** расстоянии от поверхности!

1,225 м

Пуля выйдет на **ОРБИТУ** на высоте 1,225 м от Луны. Она будет непрерывно падать, но поверхность Луны будет постоянно удаляться от нее.

Разумеется, этот эксперимент возможен только тогда, когда сопротивления воздуха нет (и препятствий на пути пули — тоже!). Он помогает понять принцип движения спутников: мы запускаем спутник на ракете за пределы земной атмосферы, потом «наклоняем» его и придаем ему достаточную **ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ** скорость. Спутник начнет падать, но поверхность Земли в это же время будет отдаляться от него.



Луна, естественный спутник Земли, тоже непрерывно падает и одновременно движется горизонтально, поэтому расстояние от Земли до Луны не меняется. (Орбита Луны имеет форму почти идеальной окружности.)

Теперь давай отправимся в космос на шаттле. Когда мы достигнем орбитальной скорости и выключим двигатели, на нас будет действовать только **СИЛА ТЯГОТЕНИЯ** и мы начнем падать на Землю.

Но то же самое будет происходить и с самим шаттлом: он начнет падать на Землю с тем же ускорением.

Мы не ускоряемся относительно шаттла, а значит, будем свободно летать внутри его, в невесомости!

Если на космический корабль действует только сила тяготения, то не важно, куда он летит, вверх, вниз или по орбите, — все предметы внутри его будут **НЕВЕСОМЫМИ**.

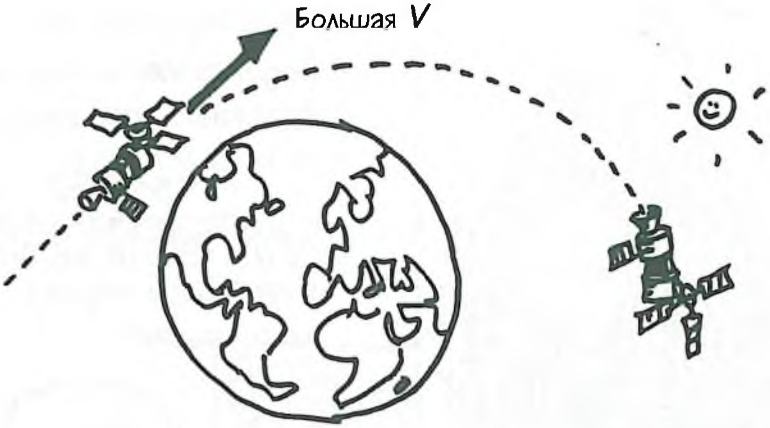
Под действием силы тяготения
возникает ускорение,
но сама СИЛА
ТЯГОТЕНИЯ
в свободном падении
не ощущается.

Это и другие наблюдения
помогли Эйнштейну понять,
что тяготение — это свойство
пространства, а не предметов.

Глава 5

Другие орбиты

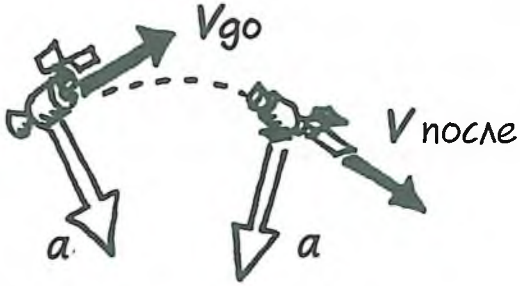
Ранее мы рассматривали только круговые орбиты. Так, спутник на круговой орбите запущен горизонтально с такой скоростью, чтобы его отклонение от прямой соответствовало кривизне круга. А что произойдет, если мы запустим спутник с другой скоростью или под другим углом?



Чтобы найти орбиту спутника, можно применить проверенный временем математический метод — метод «грубой силы».

Метод «грубой силы» начинается с расчетов по формуле силы тяготения

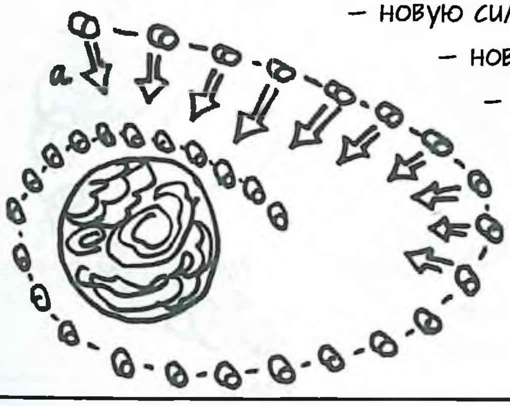
$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$



(M – масса Земли, m – масса спутника, r – расстояние между ними, G – постоянная). По этой формуле мы найдем силу, действующую на спутник, и вычислим его ускорение по второму закону Ньютона $a = F/m$. Зная ускорение, мы сможем определить, как изменится скорость спутника.

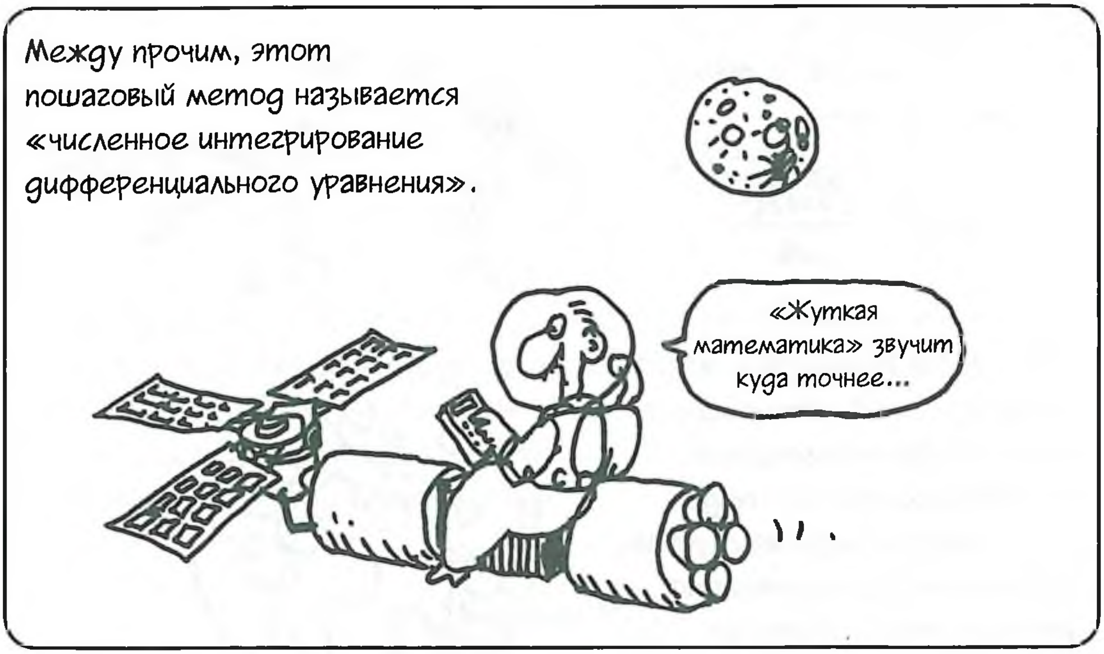
Увы, после того как спутник чуть сместится, r изменится, а значит, изменится и сила тяготения! Придется **ПЕРЕСЧИТАТЬ** ускорение и найти новую скорость спутника на следующие несколько мгновений, потом пересчитать их снова, и снова, и снова, и снова несколько тысяч раз!

На каждом шаге надо будет найти:



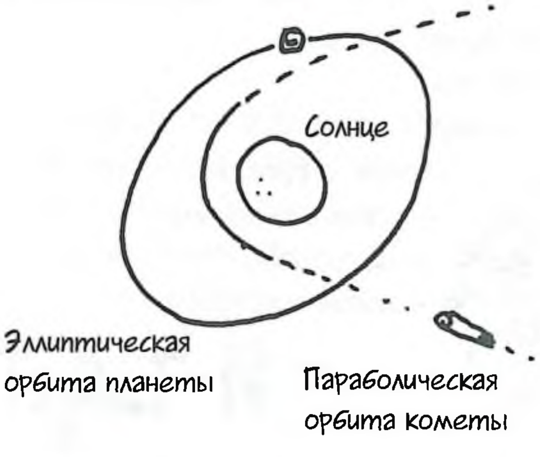
– новую силу
– новое ускорение
– новую скорость
– новое положение
– новую силу
– новое ускорение

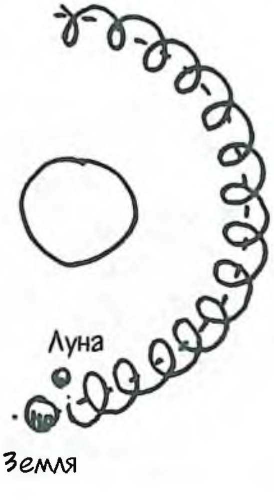
И Т.Д.!

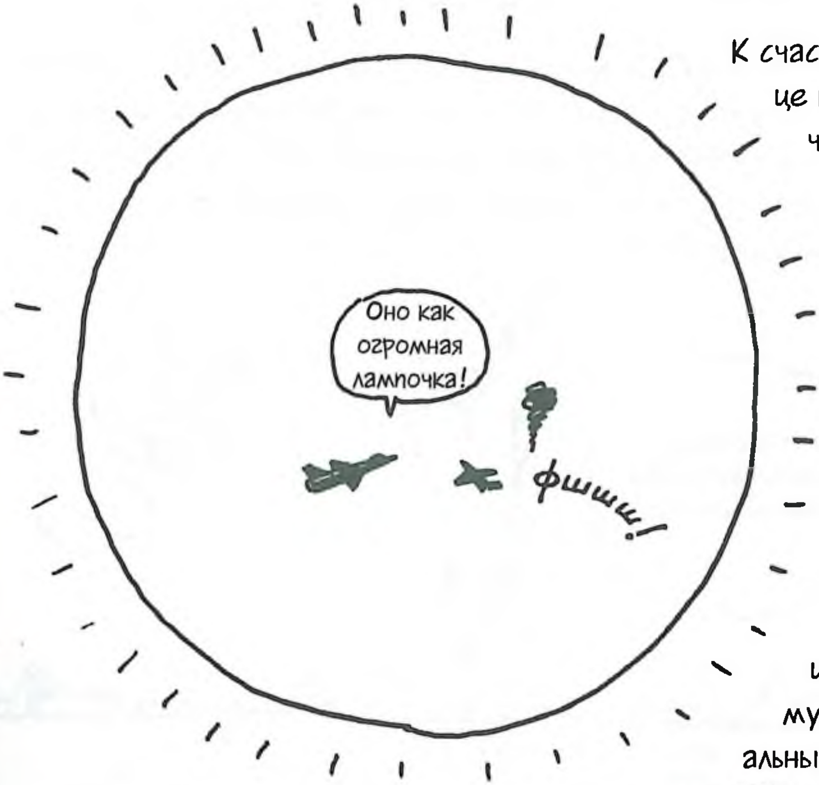


Если мы рассматриваем только два тела, формулы их орбит можно вывести методами математического анализа. Единственно возможные орбиты в теории тяготения Ньютона — это окружности, эллипсы, параболы и гиперболы.

Но если в системе больше двух тел, то наша единственная надежда — это метод «грубой силы» и компьютеры! Посмотри, по какой хитрой спирали движется Луна вокруг Солнца:

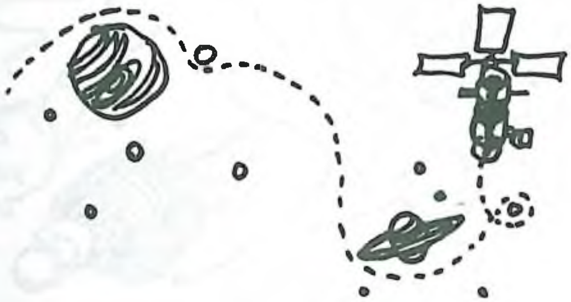






К счастью, Солнце так велико, что сила его тяготения преобладает над всеми остальными силами в Солнечной системе, а орбиты планет имеют форму почти идеальных эллипсов.

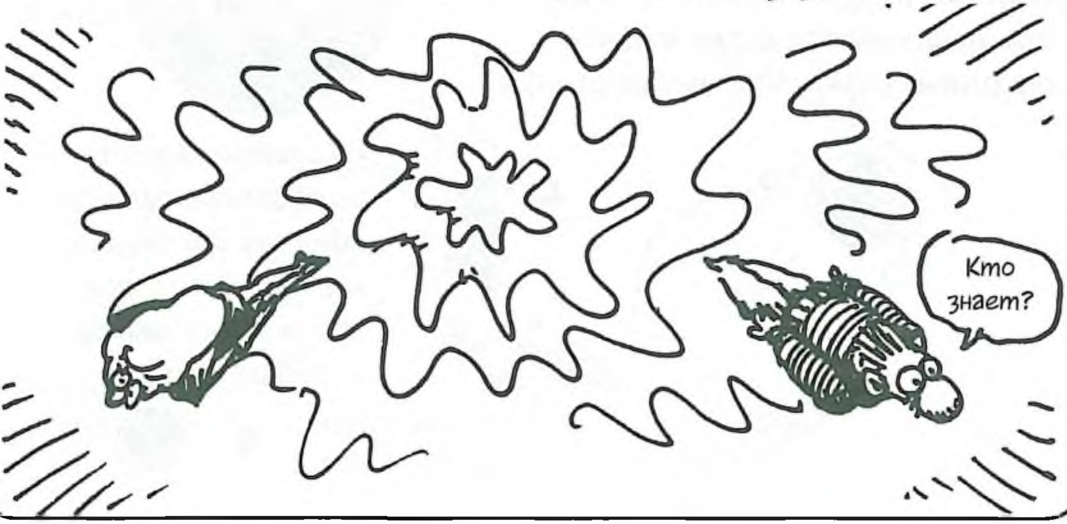
КЕПЛЕР (1571–1630), рассчитав орбиту Марса, первым показал, что планеты движутся по эллиптическим орбитам. Позднее Ньютон доказал, что эллиптическая форма орбит — следствие закона обратных квадратов.



Но орбиты планет — не идеальные эллипсы, поэтому при запуске космических зондов применяется метод «грубой силы».

Уравнения Ньютона просты. Они описывают движение **В ОБЩЕМ ВИДЕ**, а его конкретные параметры зависят от начального положения и скорости тел в системе. Солнечная система описывается простыми формулами $F = G\frac{Mm}{r^2}$ и $F = ma$, но при запуске зондов нужно выполнить гигантский объем вычислений.

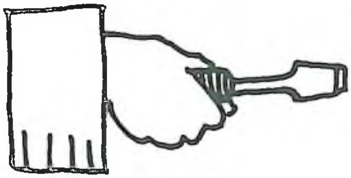
Физики часто действуют именно так: сначала они находят общие уравнения, а потом решают их для конкретного случая. Интересно, можно ли описать всю физику Вселенной несколькими уравнениями, зная начальные условия в момент **БОЛЬШОГО ВЗРЫВА?**



◊ ГЛАВА 6 ◊

ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Мы рассказали о двух первых законах Ньютона. Давай рассмотрим его третий закон:



Третий закон Ньютона: когда одно тело действует на другое, второе тело действует на первое с такой же силой, но в противоположную сторону.

Другими словами,

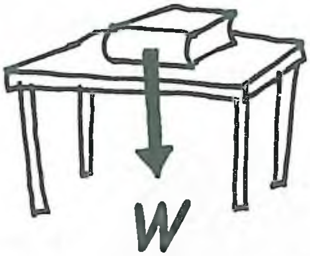
ДЕЙСТВИЕ РАВНО ПРОТИВОДЕЙСТВИЮ.

К примеру, когда я толкаю стену, она «отталкивает» меня с такой же силой. Еще пример: Земля притягивает Луну с той же силой, с какой Луна притягивает Землю.

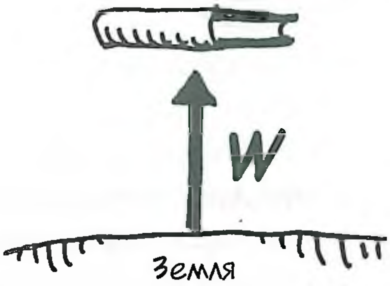
Земля притягивает Луну, поэтому Луна остается на круговой (ну, почти круговой) орбите. Но ведь Луна тоже притягивает Землю!

Из-за того, что Луна притягивает Землю с такой же силой, Земля тоже движется по небольшой орбите! Земля смещается меньше, чем Луна (то есть ускоряется меньше), потому что ее масса намного больше.

Книга лежит на столе. Какая сила противоположна весу книги *W*? Сила реакции опоры, то есть стола? НЕТ!

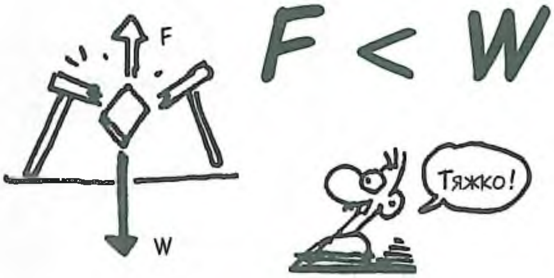


Второе тело, действующее на книгу с силой *W*, — это сама ЗЕМЛЯ! Земля притягивает книгу с силой *W*, а книга притягивает с силой *W* всю Землю!

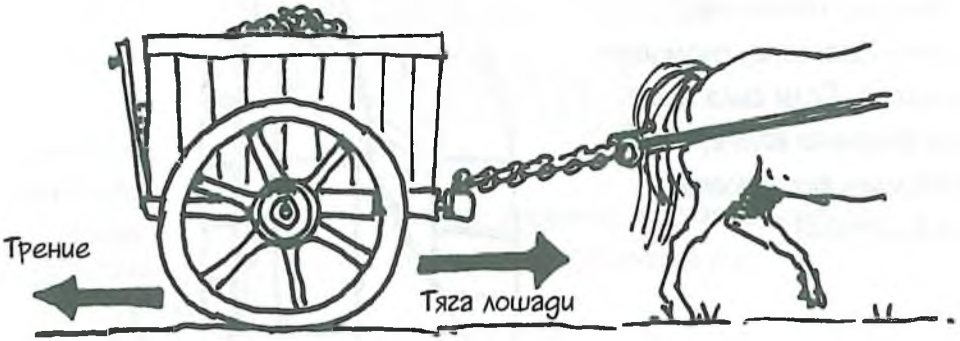


Но разве стол не толкает книгу вверх? В этом случае — да. Книга не ускоряется, значит, по второму закону Ньютона, сумма действующих на нее сил равна нулю. Так как Земля тянет книгу вниз, что-то должно толкать книгу вверх. Это «что-то» — стол, который толкает книгу с силой $F = W$. Этот случай — особый: не будь стол таким прочным, сила *F* оказалась бы меньше *W*, книга проломила бы стол и упала!

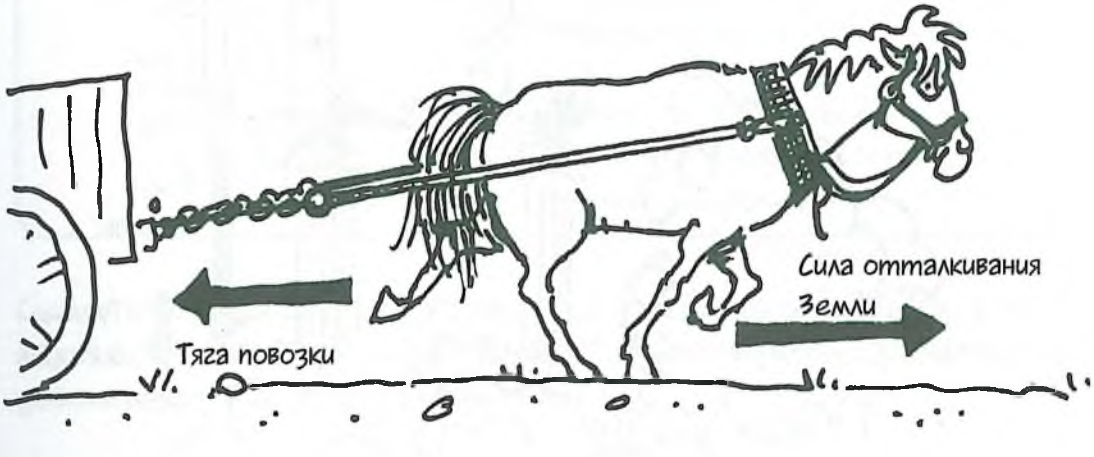
Силы, действующие на книгу



Другой пример. Как лошадь тянет повозку вперед, если повозка тянет лошадь назад с такой же силой? Чтобы разобраться, рассмотрим по отдельности силы, действующие на повозку и на лошадь.



Какие силы действуют на повозку? Лошадь тянет ее вперед, а **СИЛА ТРЕНИЯ** Земли — назад. Если сила тяги лошади больше силы трения, повозка ускорится.



Теперь посмотрим на лошадь. По третьему закону Ньютона, повозка тянет ее назад. Что же толкает лошадь вперед? Земля! Лошадь толкает Землю назад, поэтому Земля толкает ее вперед с такой же силой. Лошадь ускорится, если сможет оттолкнуться от Земли достаточно сильно, чтобы преодолеть противодействующую силу со стороны повозки.

Еще один пример: ракетный двигатель. Ракета толкает отработанные газы вниз, а газы, по третьему закону Ньютона, толкают ее вверх. Если сила тяги, направленная вверх, превысит вес ракеты, мы взлетим!

Внимание: нельзя говорить, что ракета отталкивается от воздуха. Более того, трение о воздух только тормозит ракету.

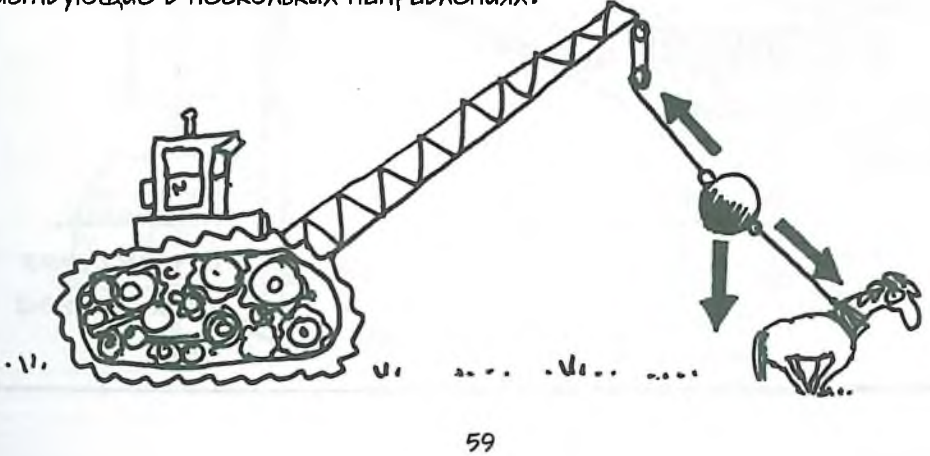
◊ ГЛАВА 7 ◊

ПОДРОБНЕЕ О СИЛАХ

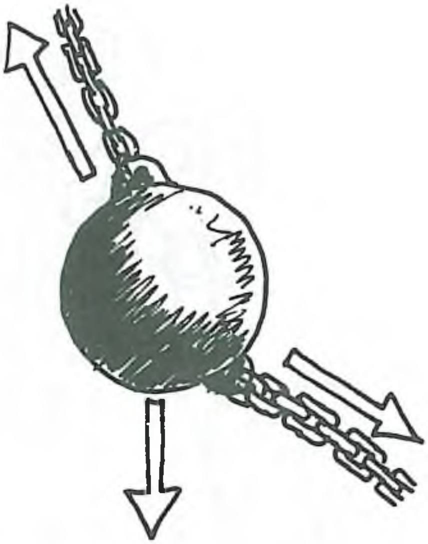
Можно сказать, что законы Ньютона описывают действие сил:

1. Если силы отсутствуют, тело сохраняет постоянную скорость.
2. Сила вызывает ускорение, пропорциональное силе и обратно пропорциональное массе тела.
3. Любому действию есть равное и противоположное противодействие.

Сила — векторная величина. У силы, как и у скорости и ускорения, есть не только **ВЕЛИЧИНА**, но и **НАПРАВЛЕНИЕ**. На этом рисунке показаны силы, действующие в нескольких направлениях.



В этом примере сумма всех сил — результирующая сила — равна нулю, так как тело не ускоряется (и снова второй закон Ньютона!).

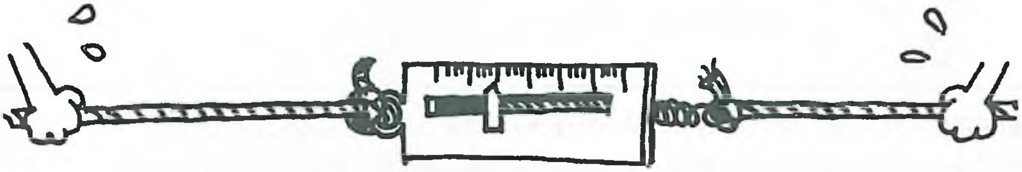


Посмотрим, какие силы действуют на лыжника, который катится с горы с постоянной скоростью. Это вес лыжника, реакция опоры и сила трения. Но **РЕЗУЛЬТИРУЮЩАЯ** сила вновь должна быть равна нулю.

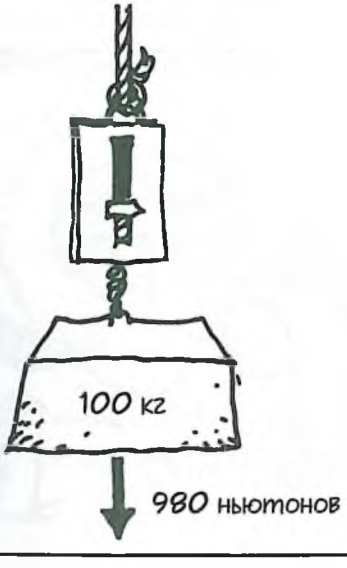
Понимаешь, почему сумма этих сил равна нулю?

Еще пример — перетягивание каната. Каждая команда тянет канат с силой в 980 ньютонов. Чему равна сила натяжения каната? Может, 2 × 980 = 1960 ньютонов?

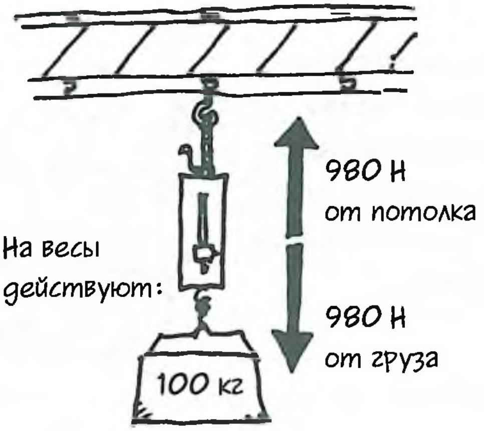
Сила натяжения определяется как величина, которую покажут пружинные весы, если мы разрежем канат и привяжем его к весам с двух сторон:



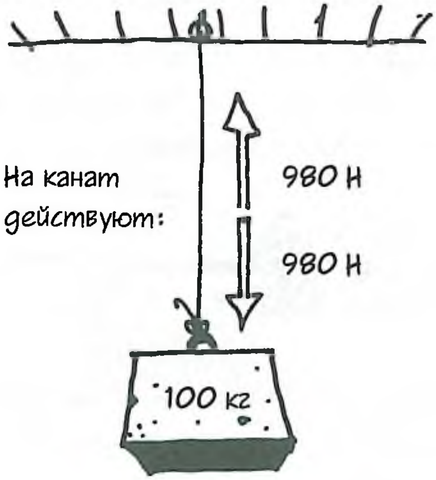
Рассмотрим похожую ситуацию: взвесим груз массой 100 кг на пружинных весах. Вес этого груза mg равен 980 ньютонов.



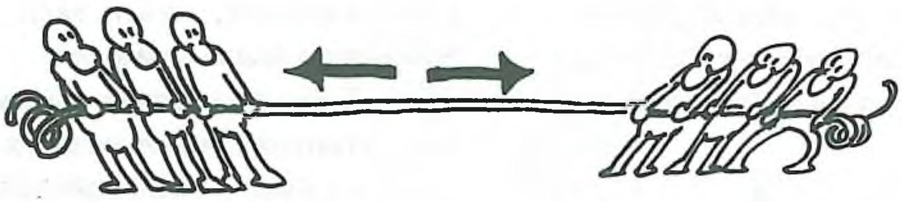
Груз тянет весы вниз с силой в 980 ньютонов, значит, весы тянут груз вверх с такой же силой. А еще весы тянут потолок вниз, а потолок тянет их вверх с той же силой в 980 ньютонов!



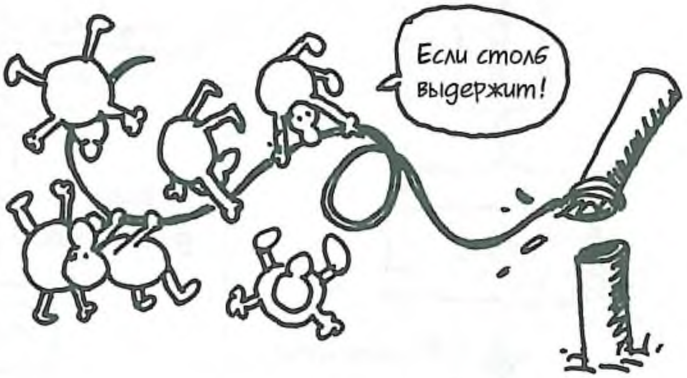
Канат передает силу от груза к потолку через весы. По третьему закону Ньютона, груз и канат тянут друг друга в разные стороны с одинаковой силой. Сила натяжения каната (показания весов) равна 980 ньютонов.

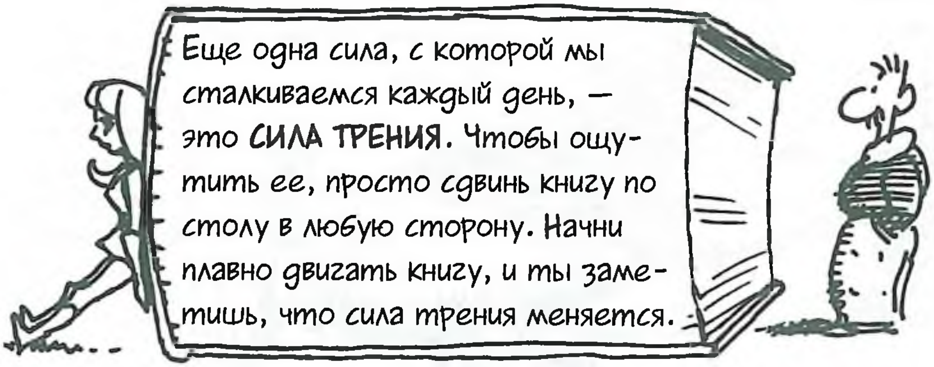


Теперь понятно, почему сила натяжения каната **ТОЖЕ** равна 980 ньютонам? Дело в том, что канат «передает» эту силу от одной команды к другой.

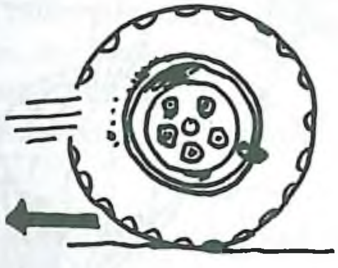


Если мы привяжем канат к столбу и за него потянут обе команды сразу, то сила натяжения удвоится!

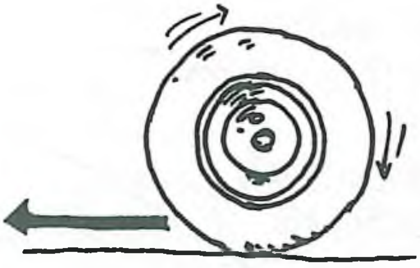




Чувствуешь, что сила трения немного уменьшается, когда книга начинает двигаться? Дело в том, что, когда поверхности неподвижны, наблюдается **СТАТИЧЕСКОЕ** трение, которое возрастает до некоторого максимального значения. **КИНЕМАТИЧЕСКОЕ** трение (трение во время движения) меньше максимального статического трения — именно поэтому машина с заблокированными колесами тормозит медленнее.

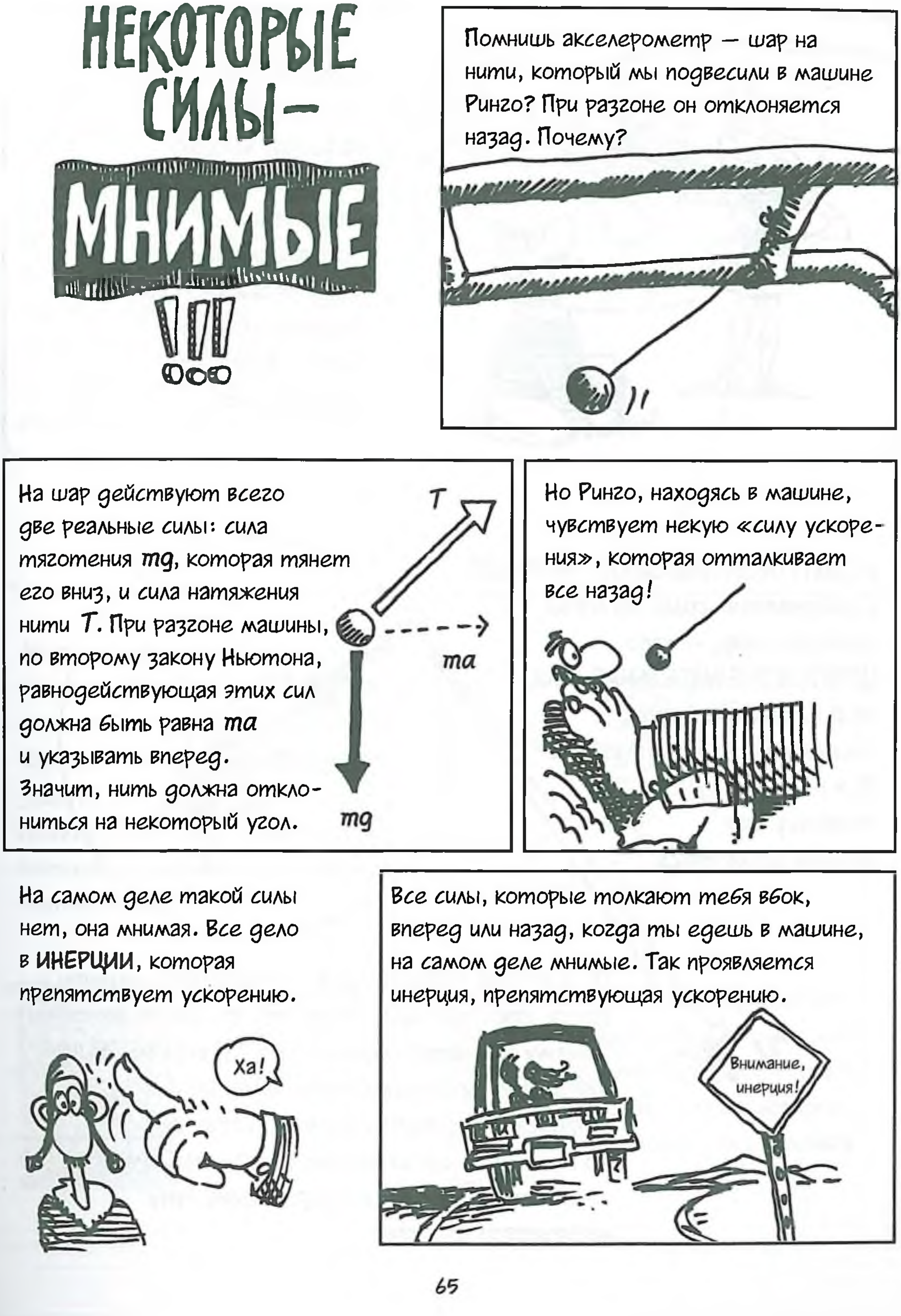


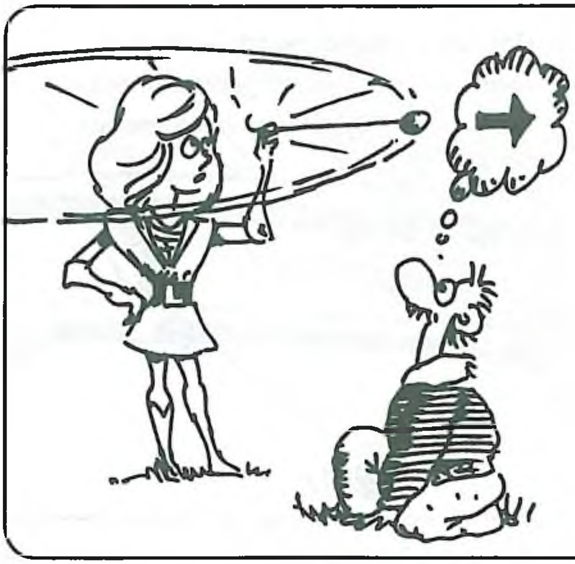
Заблокированное колесо тормозит из-за кинематического трения.



При вращении нижняя точка колеса ненадолго останавливается (!), и колесо тормозит из-за статического трения.

Еще один пример трения — трение о воздух.
Хочешь ощутить его? Высунь руку из окна машины!
Есть и другой, куда более интересный, способ ощутить трение о воздух — прыгнуть с парашютом. При прыжке на тебя действует только сила тяготения, твое ускорение равно g.
W
По мере набора скорости трение о воздух возрастает, и ускорение уменьшается.
трение
W
трение
W
На скорости от 160 до 240 км/ч трение о воздух становится равным твоему весу, и ты перестаешь ускоряться. Эта скорость называется
ПРЕДЕЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ ПАДЕНИЯ.
Трение о воздух зависит и от площади поверхности — вот почему парашют уменьшает предельную скорость примерно до 40 км/ч.


НЕКОТОРЫЕ СИЛЫ — МНИМЫЕ!!!
Помнишь акселерометр — шар на нити, который мы подвесили в машине Ринго? При разгоне он отклоняется назад. Почему?
На шар действуют всего две реальные силы: сила тяготения mg, которая тянет его вниз, и сила натяжения нити T. При разгоне машины, по второму закону Ньютона, равнодействующая этих сил должна быть равна ma и указывать вперед. Значит, нить должна отклониться на некоторый угол.
T
ma
mg
Но Ринго, находясь в машине, чувствует некую «силу ускорения», которая отталкивает все назад!
На самом деле такой силы нет, она мнимая. Все дело в ИНЕРЦИИ, которая препятствует ускорению.
Ха!
Все силы, которые толкают тебя вбок, вперед или назад, когда ты едешь в машине, на самом деле мнимые. Так проявляется инерция, препятствующая ускорению.
Внимание, инерция!



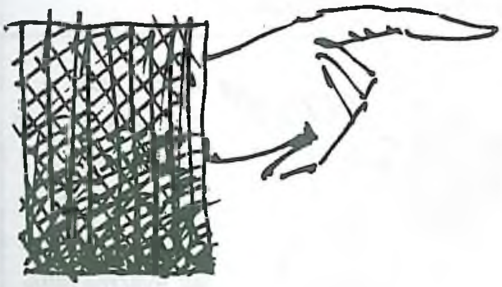
Когда я раскручиваю над головой шар на нити, многие считают, что нить натягивается под действием «центробежной силы». Но на самом деле шар не толкает никакая сила!

«ЦЕНТРОБЕЖНАЯ СИЛА» МНИМАЯ! Единственная сила, которая толкает шар, — это **ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНАЯ** сила, сила натяжения нити, направленная в центр круга. Она не равна нулю, поэтому шар должен ускоряться.

Он и правда ускоряется в направлении к центру круга, как и все предметы при круговом движении. Почему же натягивается нить? Из-за **ИНЕРЦИИ** шара. Под действием этой инерции шар стремится улететь вдаль по касательной, но нить постоянно тянет его внутрь круга — точно так же Земля удерживает Луну на круговой орбите.

В парке аттракционов можно ощутить сразу несколько мнимых сил. Посмотри на аттракцион **РОТОР**: цилиндр раскручивается, людей вдавливает в стену, затем пол опускается, и они оказываются словно «приколотыми» к стене!

Люди внутри ротора ощущают мнимую **ЦЕНТРОБЕЖНУЮ** силу, которая выталкивает их наружу. Однако сторонний наблюдатель знает, что на них действует только **ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНАЯ** сила, которая толкает посетителей внутрь круга.

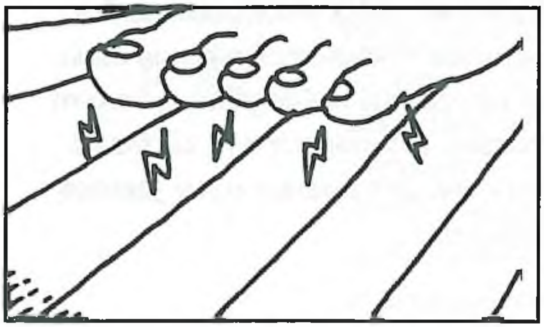


В ускоряющейся или вращающейся системе появляются мнимые силы. Но сторонний наблюдатель может описать движение тел в системе при помощи реальных сил и законов Ньютона.

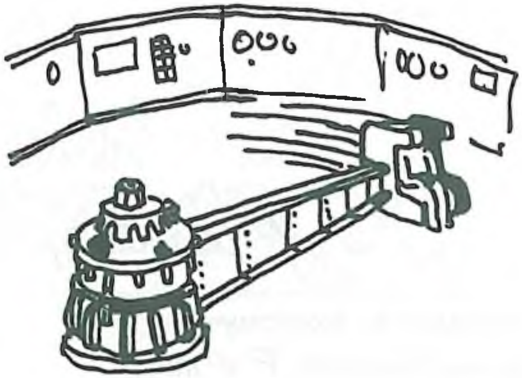
Разных сил так много, и кажется, что классифицировать их просто невозможно. Однако физикам удалось показать, что **ВСЕ** известные силы во Вселенной относятся к одному из

ЧЕТЫРЁХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ:

Кстати, единственное фундаментальное взаимодействие, которое ты ощущаешь, — **ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ!** Когда ты толкаешь стену (а она отталкивает тебя), ты чувствуешь силы отталкивания между атомами. Силу тяготения ты тоже не чувствуешь — ты ощущаешь электромагнитные силы со стороны пола, которые противодействуют гравитации.



«Центробежная сила» напоминает тяготение — она тоже вызывает одинаковое ускорение независимо от массы тела. Вот почему для тренировки космонавтов мы можем смоделировать тяготение на огромной центрифуге.



ГЛАВА 8
ИМПУЛЬС И ИМПУЛЬС СИЛЫ

Вернемся ко второму закону Ньютона, $F = ma$. Ускорение — это скорость изменения скорости, поэтому это уравнение можно записать так:

СИЛА = масса × быстрота изменения скорости

Ньютон же считал, что это уравнение должно быть таким:

СИЛА = быстрота изменения (масса × скорость)

Это то же самое, только если масса не меняется!

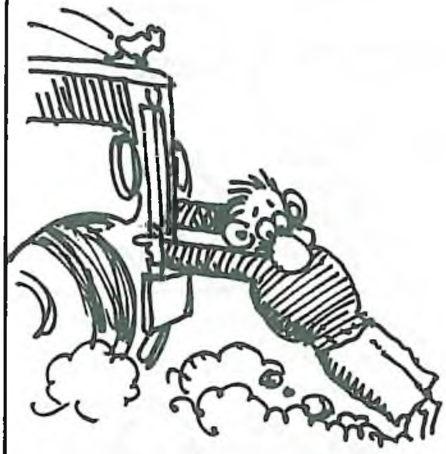
Величина «масса X скорость» называется

ИМПУЛЬСОМ.

Наше уравнение указывает: сила зависит от быстроты изменения импульса.

Предмет с малой массой и небольшой скоростью, например коляска с ребенком, имеет маленький импульс. Не нужно прилагать больших усилий, чтобы уменьшить импульс коляски до нуля (то есть остановить ее).

А вот импульс грузовика...



Давай подумаем, сколько времени нужно для полной остановки грузовика.
Уравнение таково:

$$\text{сила} = \text{быстрота изменения импульса}$$

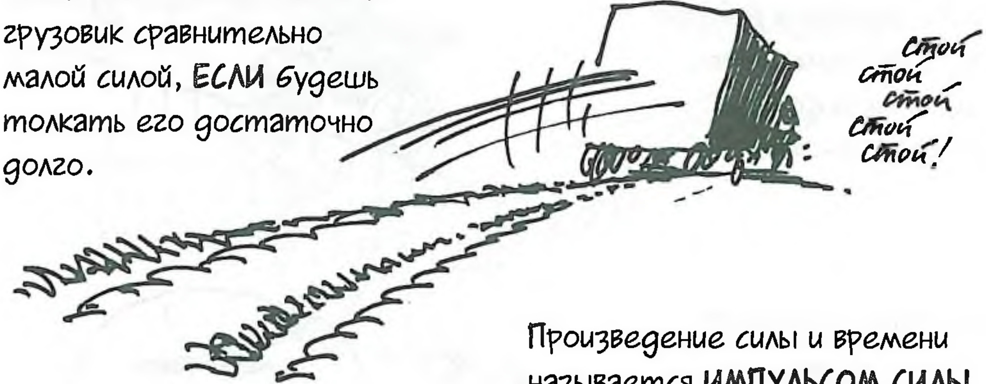
или

$$\text{сила} = \frac{\text{изменение импульса}}{\text{время}}$$

или

$$\text{сила} \times \text{время} = \text{изменение импульса}$$

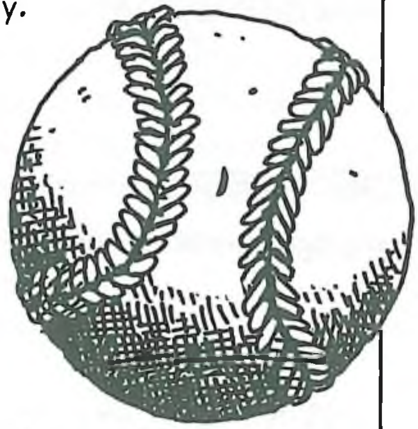
Ты **СМОЖЕШЬ** остановить грузовик сравнительно малой силой, **ЕСЛИ** будешь толкать его достаточно долго.



Произведение силы и времени называется **ИМПУЛЬСОМ СИЛЫ**.

Итак: **ИМПУЛЬС СИЛЫ = ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА.**
Небольшая сила, приложенная длительное время, вызовет такое же изменение импульса, как большая сила, приложенная короткое время.

Обычно мы представляем импульс силы как большую силу, действующую очень недолго, например при ударе битой по мячу.



Задача бьющего — изменить импульс мяча со среднего на большой и поменять его направление на противоположное. Так как бита касается мяча лишь долю секунды, сила должна быть очень большой.

Иногда силу, необходимую для изменения импульса, нужно снизить. Например, импульс парашютистки при приземлении с раскрытым парашютом все равно слишком велик.

При приземлении на прямых ногах импульс мгновенно снизится до нуля и колени могут не выдержать!

Лучше приземлиться с согнутыми коленями и перекатиться, чтобы увеличить время приземления и уменьшить силу.

Сохранение импульса

Давай поговорим о взрывах и столкновениях, когда предметы сталкиваются или разлетаются в стороны.

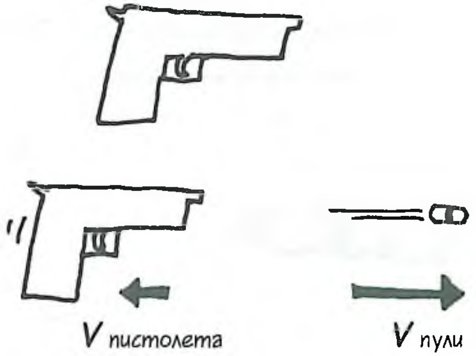
Скоро произойдет столкновение.

Скоро произойдет взрыв.

Рассмотрим, к примеру, выстрел из пистолета. Его можно считать взрывом, ведь пуля летит вперед, а пистолет отдает назад. Для простоты представим, что пуля вылетает из дула под действием пружины:

Распрямляясь, пружина действует на пулю с некоторой силой.
По третьему закону Ньютона, пуля действует на систему «пружина — пистолет» с такой же силой, но в противоположном направлении.
Эти силы вызывают противоположные изменения импульса. Так как масса пистолета больше массы пули, он отскакивает назад намного медленнее, чем пуля вылетает из ствола.

В этом случае общий импульс не изменится. Если пистолет и пуля изначально были неподвижны, их суммарный импульс равнялся нулю. Так как действие пружины не меняет общий импульс, конечный импульс тоже будет равен нулю: импульсы пистолета и пули противоположны.

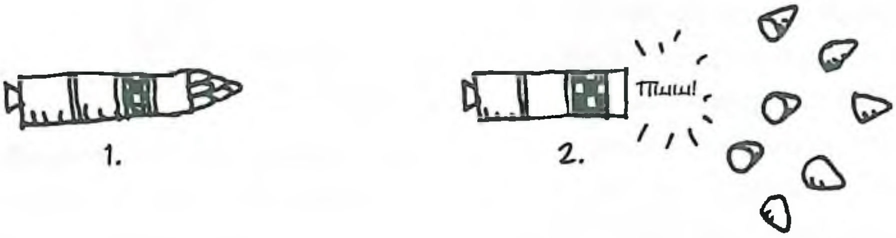


Общий импульс до и после выстрела одинаковый.

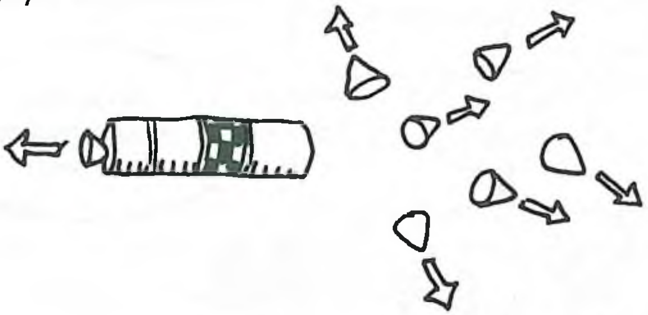
После недолгих споров ученые решили, как лучше сказать «импульс не меняется» по-научному.

ИМПУЛЬС СОХРАНЯЕТСЯ.

Сохранение импульса — следствие третьего закона Ньютона. Рассмотрим ракету, которая при взрыве разлетается на несколько частей, как эта ракета с разделяющейся боеголовкой.

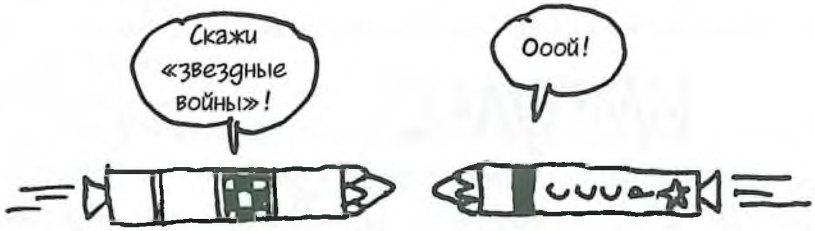


Силы, действующие между частями ракеты, называются **ВНУТРЕННИМИ**. (Силы могут быть и внешними — например тяготение). По третьему закону Ньютона, все внутренние силы можно объединить в пары сил противоположной величины. Любая сила, действующая на какую-либо из частей, компенсируется противоположной силой, действующей на другую часть.



Сумма этих сил равна нулю.

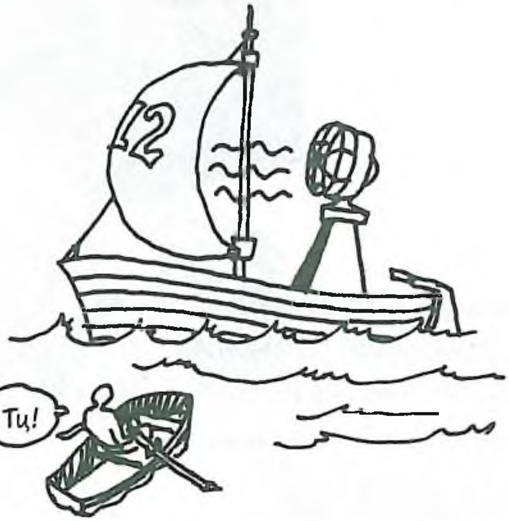
Следовательно, внутренние силы **НЕ МЕНЯЮТ ОБЩИЙ ИМПУЛЬС**. При взрывах импульс сохраняется.



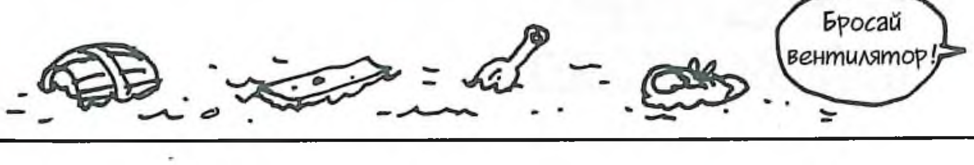
Это же верно и для столкновений — их можно рассматривать как «взрывы наоборот».

Наш пример с ракетой помогает понять третий закон Ньютона и закон сохранения импульса. Отработанные газы, вылетающие из сопла назад, придают ракете ускорение и толкают ее вперед. Еще пример: представь, что у моего скафандра отказало устройство маневрирования. Как мне вернуться на корабль? Нужно бросить что-нибудь, например ключ, в противоположную сторону.

Если направить вентилятор в парус, поплывет ли лодка? Нет! (Нужно, чтобы поток воздуха был частично направлен мимо паруса или отражался от него в другую сторону.)



Чтобы лодка поплыла вперед, нужно бросить что-нибудь назад.



Сначала закон сохранения импульса выводился из третьего закона Ньютона, но теперь ученые пришли к выводу: закон сохранения импульса более фундаментальный, а закон Ньютона — лишь его следствие. В любой замкнутой системе по определению нет внешних сил, поэтому импульс в ней сохраняется.

Всю Вселенную в целом можно считать замкнутой системой, ведь очевидно, что на нее не действуют внешние силы. Значит, **ОБЩИЙ ИМПУЛЬС ВСЕЛЕННОЙ НЕИЗМЕНЕН.**

ГЛАВА 9

ЭНЕРГИЯ

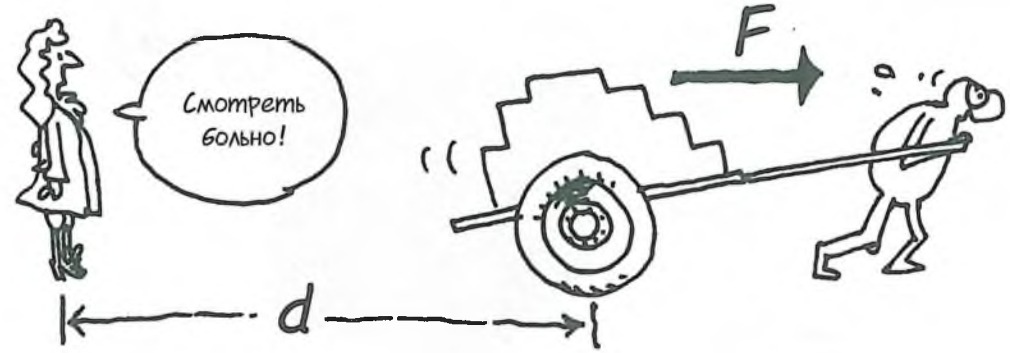
Исаак Ньютон практически в одиночку создал науку механику, но упустил одно важное понятие — **ЭНЕРГИЮ**.

Энергия существует во многих формах, но ее основное определение дается через

РАБОТУ.

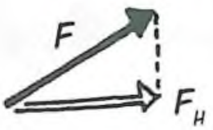
Все мы примерно представляем, что такое работа. Физики дают ей точное определение: работа совершается тогда, когда под действием силы *F* тело проходит расстояние *d*. Работа определяется как

ПРОИЗВЕДЕНИЕ СИЛЫ НА РАССТОЯНИЕ

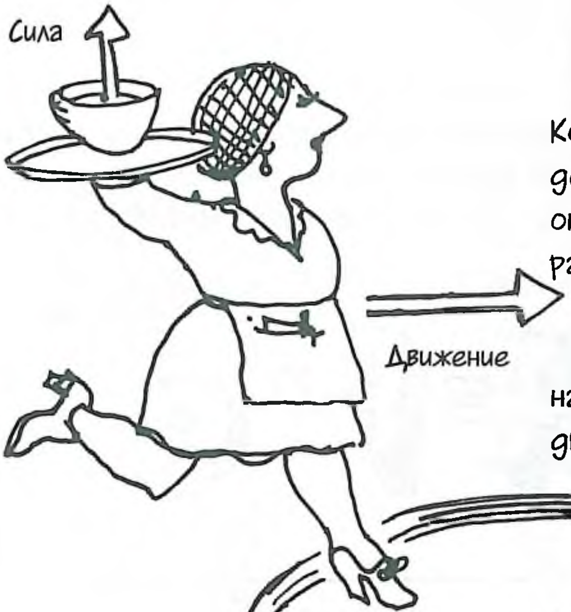


$$A = F \times d$$

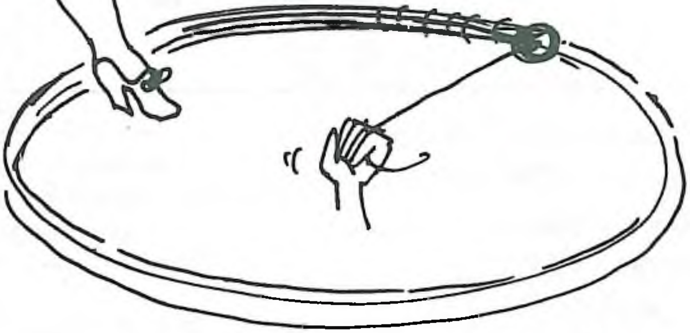
В этом определении учитывается только сила в направлении движения. Если я тяну тележку под углом, работу совершает только горизонтальная часть силы.



Работа на участке длиной d равна $F_н \times d$



Когда официантка держит поднос, она не совершает работы, так как приложенная сила перпендикулярна направлению движения.



Когда я вращаю шар на нити с постоянной скоростью, то тоже не совершаю работу.
Сила, направленная к центру, всегда перпендикулярна скорости шара (тангенциальной). Тем не менее я все же совершу работу в самом начале, когда начну раскручивать шар.

Кстати, этот же пример показывает: при вращении Луны по круговой орбите Земля не совершает работы, ведь сила тяготения перпендикулярна направлению движения!

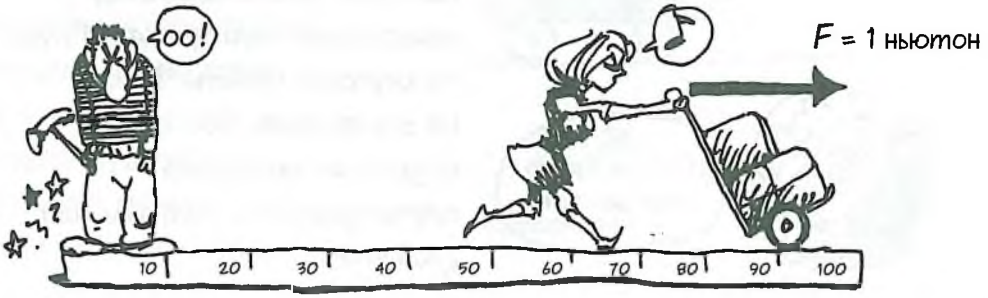
ЭНЕРГИЯ

определяется как способность совершить работу. При выделении энергии совершается работа, а при совершении работы над предметом его энергия возрастает. Получается, что работа и энергия **ЭКВИВАЛЕНТНЫ**, и можно записать:

$$E = A = F \times d.$$

Единица энергии в британской системе — **ФУТ · ФУНТ**, в метрической — **НЬЮТОН · МЕТР**, или **ДЖОУЛЬ**.

Итак: 1 **ДЖОУЛЬ** — это возможность приложить силу в 1 **НЬЮТОН** на расстоянии в 1 **МЕТР**.



Кинетическая и потенциальная энергия

Представь, что я бросаю мяч. При этом я совершаю работу, так как прилагаю силу F на расстоянии d. Мяч получает энергию — энергию движения, или **КИНЕТИЧЕСКУЮ** энергию. Простые расчеты* показывают, что эта энергия

$$\text{К.Э.} = \frac{1}{2} m v^2$$

Здесь m — масса мяча, v — его скорость.

Теперь представь, что я поднимаю Ринго на высоту h. Я прикладываю силу W, равную его весу, на расстоянии h, то есть совершаю работу $A = Wh = mgh$. В верхней точке Ринго неподвижен, но его энергия увеличилась на mgh — просто потому, что он находится в поле тяготения Земли. Эта энергия называется

ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ.

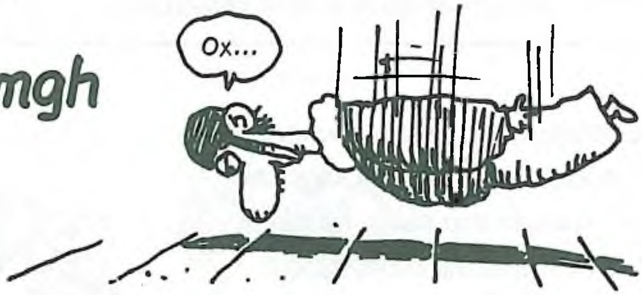
$$\text{П.Э.} = mgh$$

* Пусть F — постоянная. $F = ma$, значит, к.э. $= F \cdot d = mad$. Но $d = \frac{1}{2}at^2$, поэтому к.э. $= \frac{1}{2}m(at)^2$. Так как $v = at$, к.э. $= \frac{1}{2}mv^2$.

Потенциальная энергия называется так потому, что ее можно преобразовать в «реальную» кинетическую энергию. Для этого нужно всего лишь отпустить Ринго!

Он будет падать все быстрее, и его потенциальная энергия будет постепенно превращаться в кинетическую. В нижней точке, перед ударом о Землю, потенциальная энергия Ринго будет нулевой — вся исходная потенциальная энергия превратится в кинетическую. Значит,

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$



Отсюда можно выразить v — скорость Ринго в момент удара:

$$v = \sqrt{2gh}$$

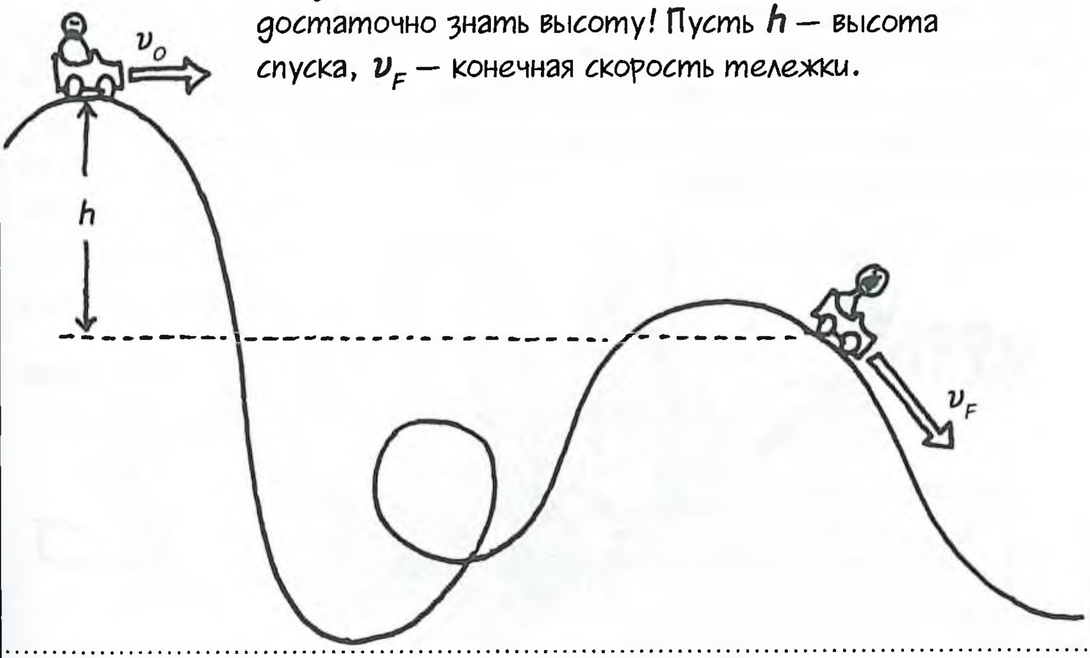
Последнее равенство $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$ — пример

Сохранения энергии

Постепенно ученые поняли, что энергия, как и импульс, сохраняется.

(Трудность заключалась в том, что энергия в отличие от импульса проявляется по-разному, например в виде тепла.)

Вот один из примеров сохранения энергии. Если известна начальная скорость тележки v_0, мы можем найти ее скорость в любой точке — достаточно знать высоту! Пусть h — высота спуска, v_F — конечная скорость тележки.



Имеем:

Начальная энергия = $\frac{1}{2}mv_0^2 + mgh$

Конечная энергия = $\frac{1}{2}mv_F^2$

По закону сохранения энергии, эти величины равны.

$\frac{1}{2}mv_F^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 + mgh$, значит,

$$v_F = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$$

По закону сохранения энергии, общая энергия системы не меняется, но переходит из одной формы в другую. Как изменится энергия Ринго при ударе о пол? И кинетическая, и потенциальная энергия исчезнут!

Куда же они делись?

Рассмотрим момент удара. Часть энергии превратится в ЗВУК, часть уйдет на деформацию пола и самого Ринго. Еще часть, точнее, большая часть энергии, превратится в ТЕПЛО. После столкновения Ринго и пол немного нагреются, так как при ударе молекулы «встряхнутся», а тепло – это не что иное, как кинетическая энергия миллиардов молекул!

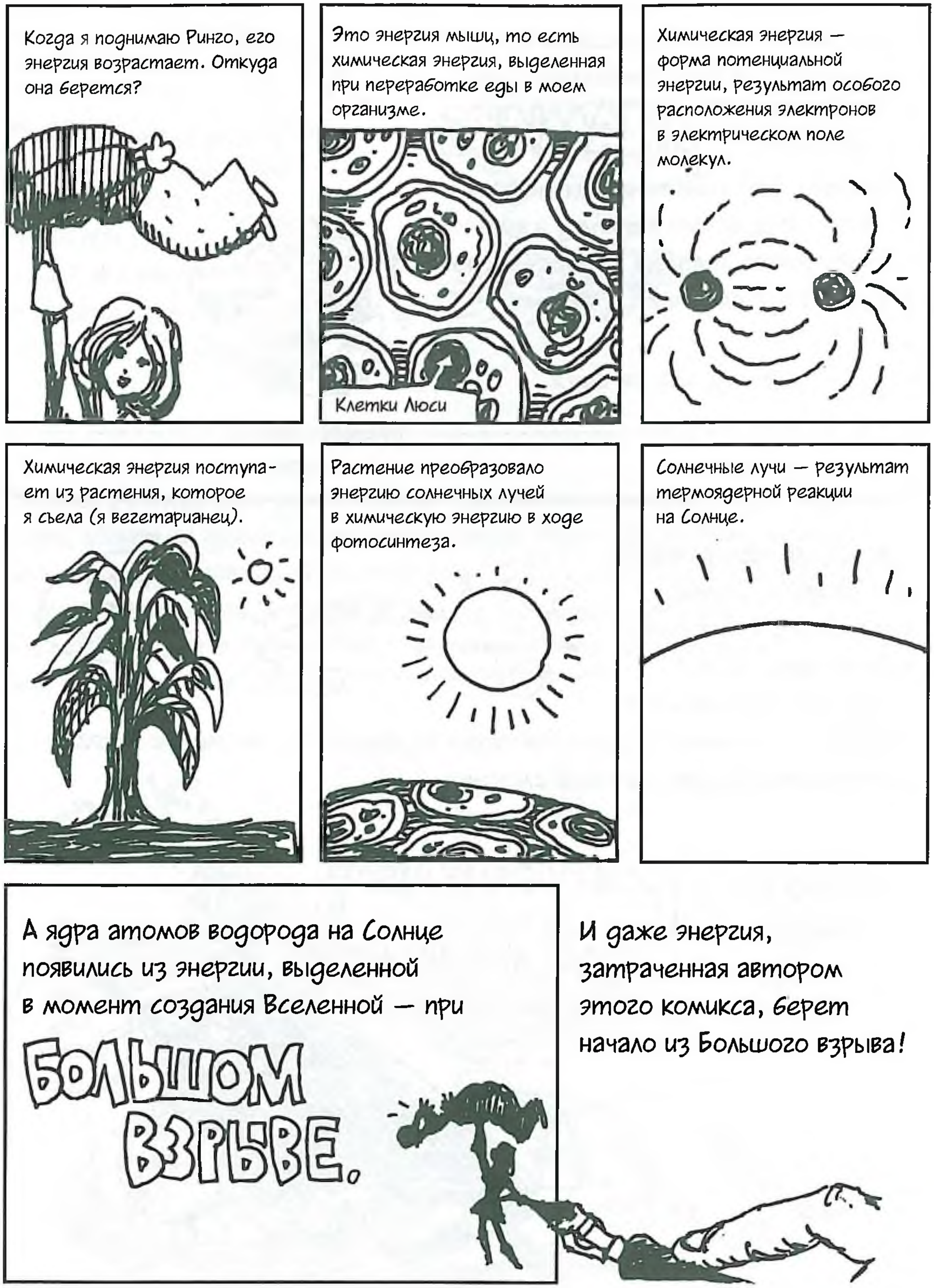
Энергия постоянно переходит из одной формы в другую. Благодаря науке ТЕРМОДИНАМИКЕ известно, что кинетическая энергия легко превращается в тепло, а вот преобразовать тепло в кинетическую энергию куда сложнее.

Кинетическая энергия переходит в тепло.

Преобразователь тепла в движение

Двигатели автомобилей преобразуют тепло в движение, но не очень эффективно. Любой машине нужна система охлаждения, и много тепла тратится впустую. Тем не менее энергия сохраняется всегда. Другими словами:

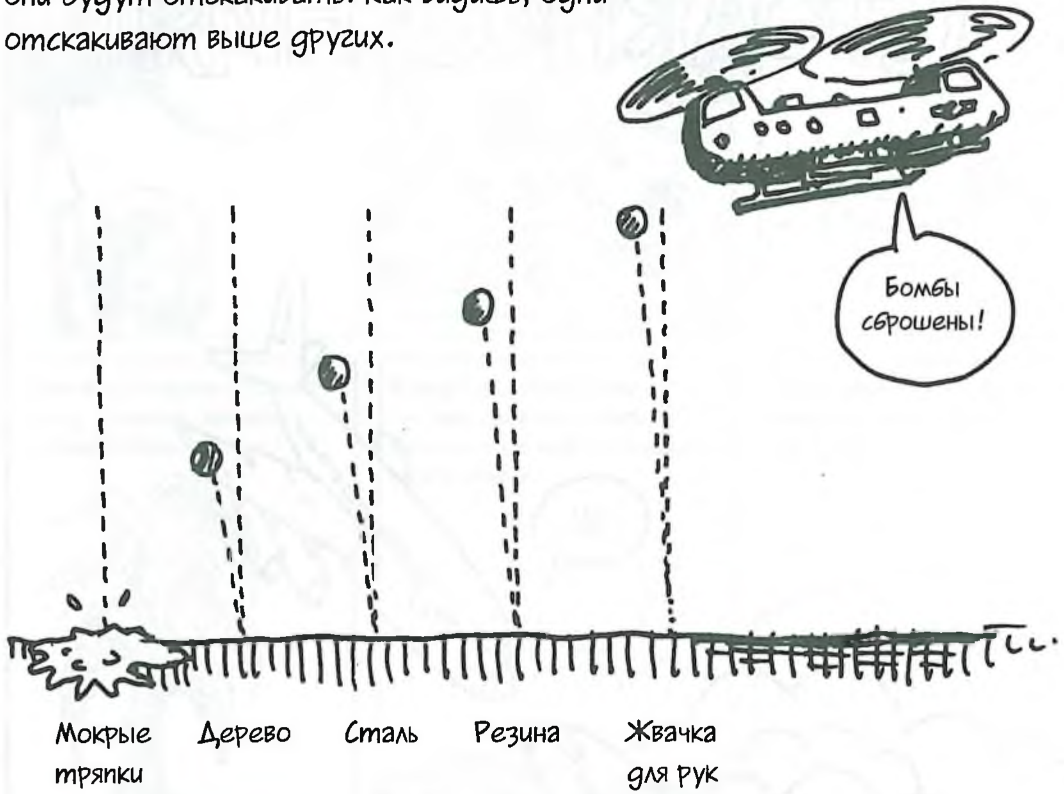
ТЕПЛО НА ВХОДЕ = { СОВЕРШЕННАЯ РАБОТА + ТЕПЛО НА ВЫХОДЕ



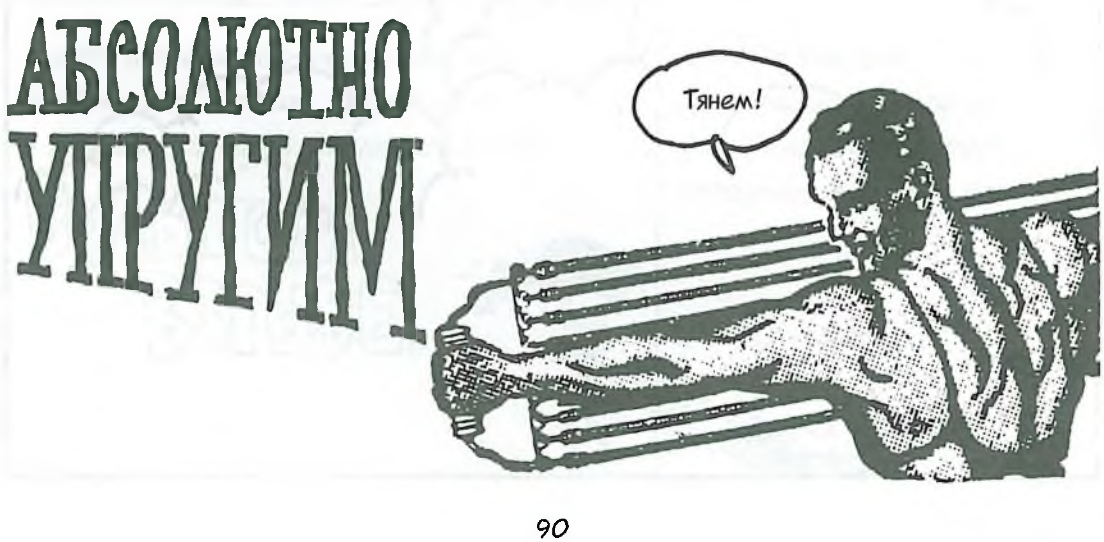
Когда я поднимаю Ринго, его энергия возрастает. Откуда она берется?
Это энергия мышц, то есть химическая энергия, выделенная при переработке еды в моем организме.
Клетки Люси
Химическая энергия — форма потенциальной энергии, результат особого расположения электронов в электрическом поле молекул.
Химическая энергия поступает из растения, которое я съела (я вегетарианец).
Растение преобразовало энергию солнечных лучей в химическую энергию в ходе фотосинтеза.
Солнечные лучи — результат термоядерной реакции на Солнце.
А ядра атомов водорода на Солнце появились из энергии, выделенной в момент создания Вселенной — при
БОЛЬШОМ ВЗРЫВЕ.
И даже энергия, затраченная автором этого комикса, берет начало из Большого взрыва!

ГЛАВА 10
СТОЛКНОВЕНИЯ

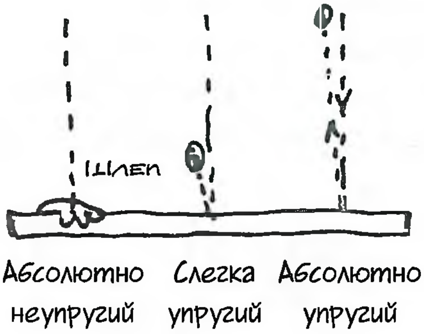
Столкновения — прекрасный пример сохранения импульса и энергии. Рассмотрим столкновение предметов с землей. Будем бросать на землю шарики из разных материалов и посмотрим, как высоко они будут отскакивать. Как видишь, одни отскакивают выше других.



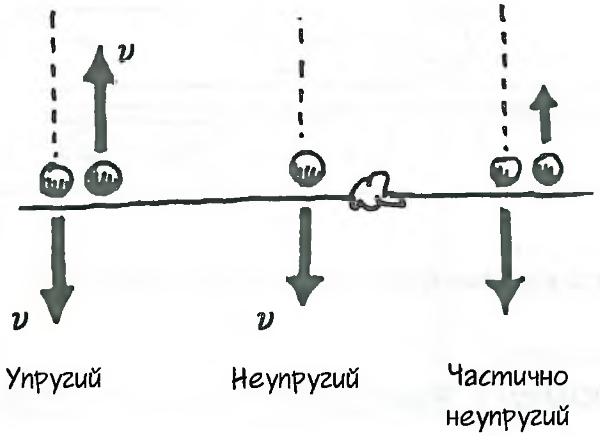
Если шар отскакивает на исходную высоту, то столкновение называется



Столкновения бывают разными, от абсолютно упругих до абсолютно неупругих. При абсолютно неупругом ударе мяч вообще не отскакивает от земли, как, например, комок ваты, тряпок или пластилина.



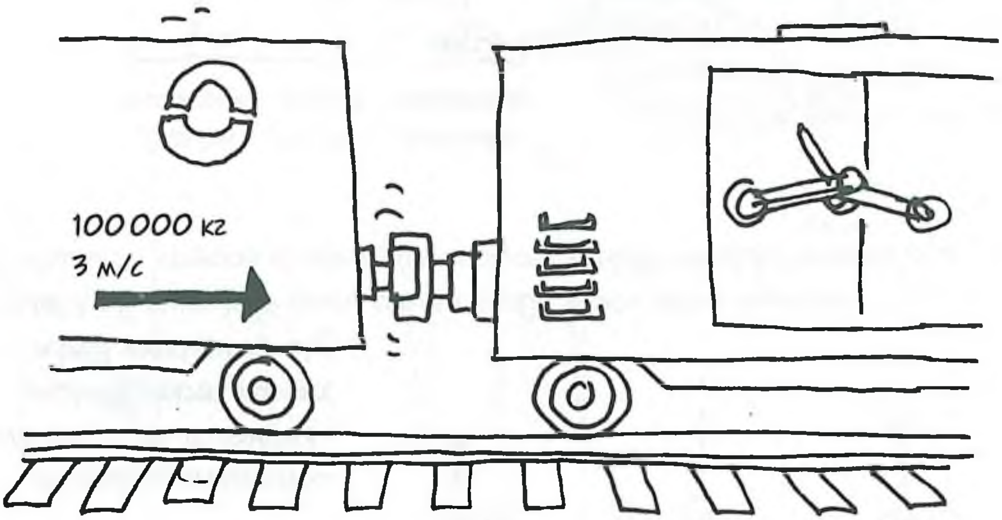
При абсолютно упругом ударе кинетическая энергия вообще не переходит в тепло, а скорость шара после удара точно равна скорости до удара.



При неупругом ударе кинетическая энергия предмета частично или полностью теряется.

Абсолютно упругие удары встречаются и в реальном мире — это столкновения атомов. Кстати, тепло — это кинетическая энергия множества беспорядочно движущихся атомов, поэтому на уровне 1–2 атомов тепла не существует!

Рассмотрим абсолютно неупругий удар. Груженый товарный вагон массой 100 000 кг катится со скоростью 3 м/с и ударяется о неподвижный вагон массой 50 000 кг. При столкновении срабатывает сцепка (поэтому удар неупругий). Что будет дальше?



Решение. Нужно найти скорость сцепленных вагонов. Обозначим ее v. Имеем:

Начальный импульс = 100 000 кг × 3 м/с

Конечный импульс = 150 000 кг × v

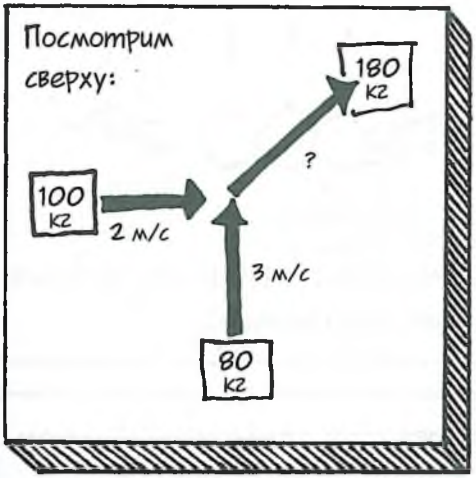
Так как импульс сохраняется, эти величины равны:

$$150\,000 \text{ кг} \times v = 300\,000 \, \frac{\text{м} \cdot \text{кг}}{\text{с}}$$

Значит,

$$v = 2 \text{ м/с}$$

Задача. Футболист массой 80 кг бежит на север со скоростью 3 м/с. В него врезается соперник массой 100 кг, бегущий на восток со скоростью 2 м/с. Найди скорости футболистов после столкновения.



Импульс, напр. на восток, $= 200 \frac{\text{м} \cdot \text{кг}}{\text{с}}$

Импульс, напр. на север, $= 240 \frac{\text{м} \cdot \text{кг}}{\text{с}}$

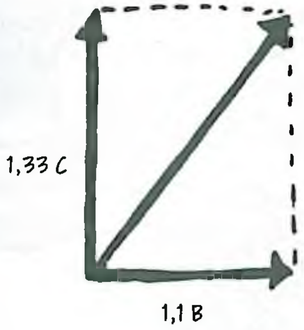
Общая масса = 180 кг

Имеем:

Итоговая скорость в напр. на восток = 200/180 = 1,1 м/с

Итоговая скорость в напр. на север = 240/180 = 1,33 м/с

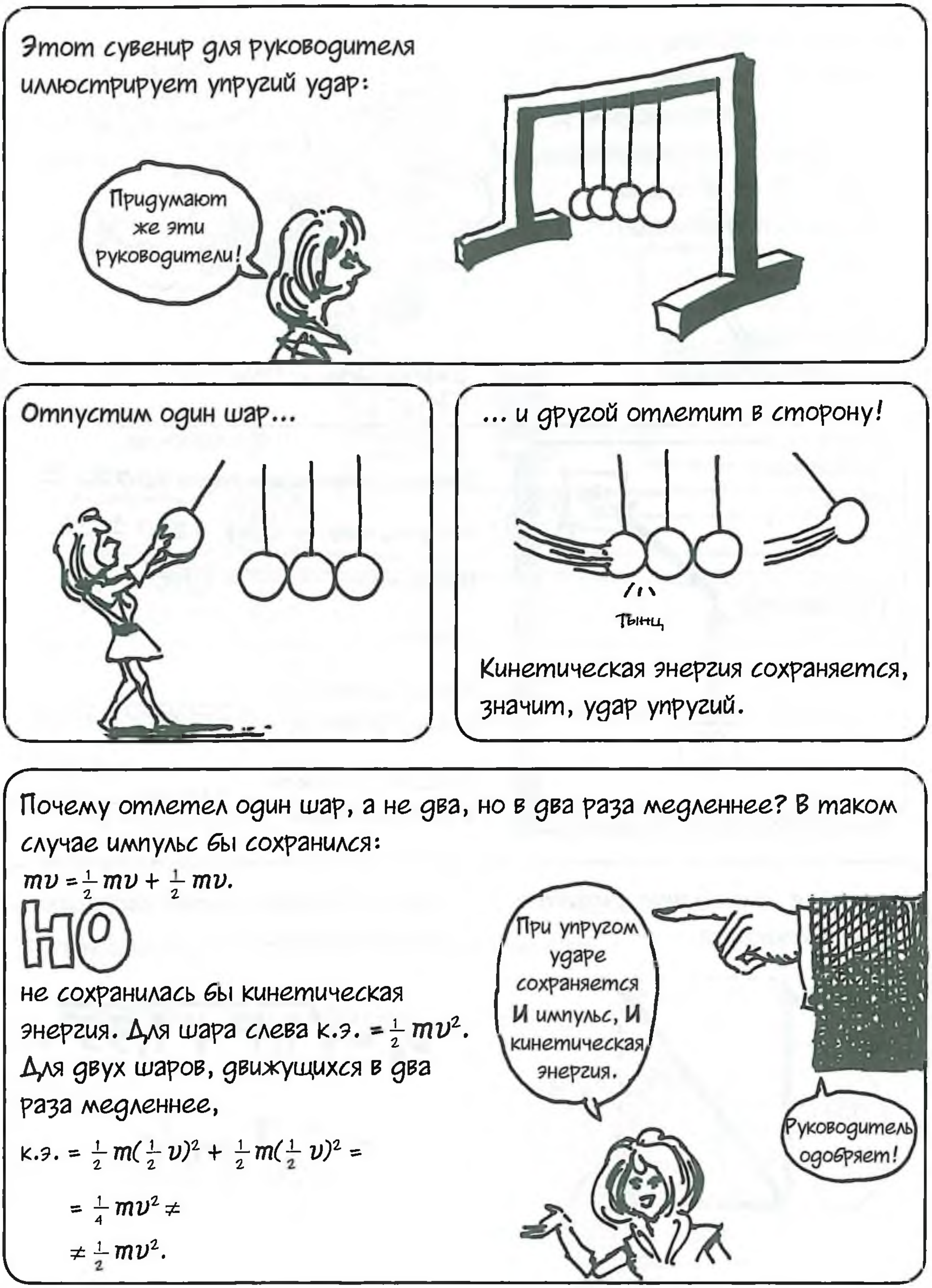
Итоговое направление задается суммой векторов:

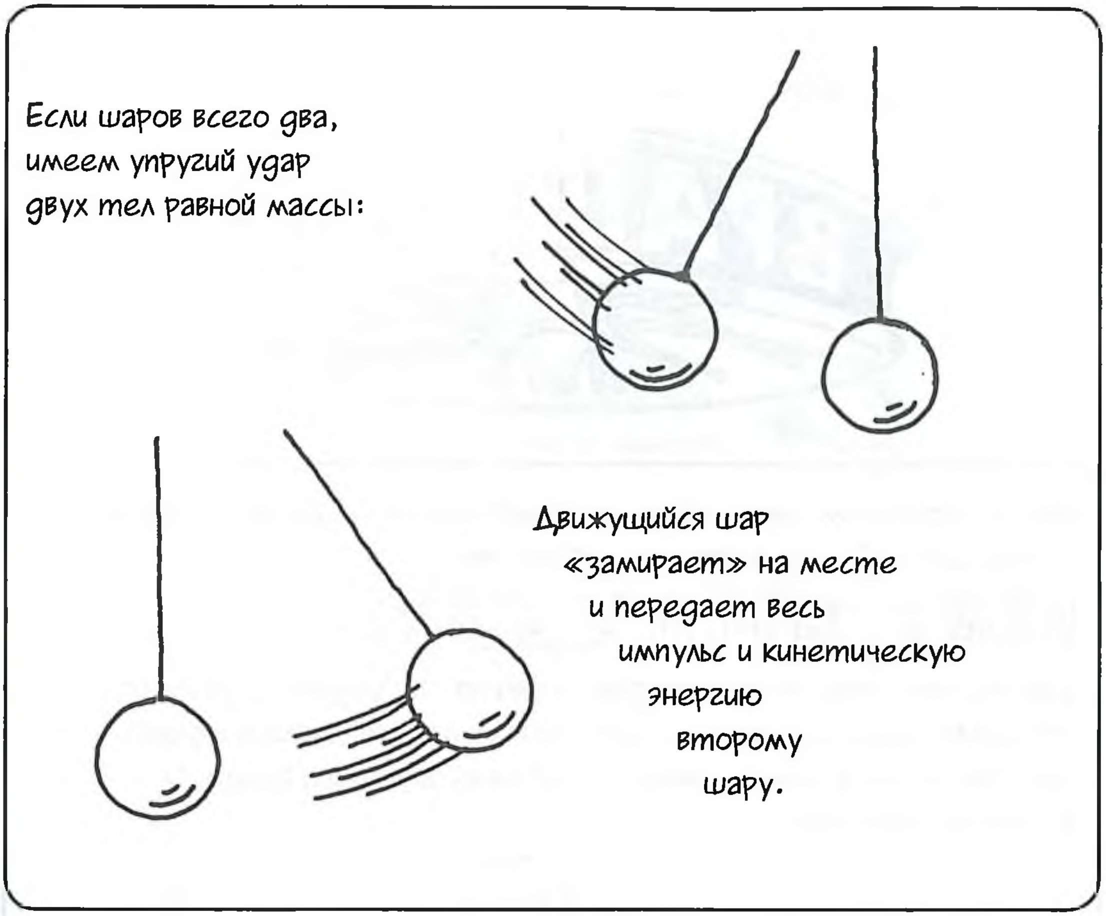


Длина стрелки укажет скорость футболистов:

$$v_F = \sqrt{1{,}1^2 + 1{,}33^2} =$$

$$= 1{,}7 \text{ м/с}$$


Этот сувенир для руководителя иллюстрирует упругий удар:
Придумают же эти руководители!
Отпустим один шар...
... и другой отлетит в сторону!
Тынц
Кинетическая энергия сохраняется, значит, удар упругий.
Почему отлетел один шар, а не два, но в два раза медленнее? В таком случае импульс бы сохранился:
$mv = \frac{1}{2}mv + \frac{1}{2}mv.$
НО
не сохранилась бы кинетическая энергия. Для шара слева к.э. $= \frac{1}{2}mv^2$.
Для двух шаров, движущихся в два раза медленнее,
к.э. $= \frac{1}{2}m(\frac{1}{2}v)^2 + \frac{1}{2}m(\frac{1}{2}v)^2 =$
$= \frac{1}{4}mv^2 \neq$
$\neq \frac{1}{2}mv^2.$
При упругом ударе сохраняется И импульс, И кинетическая энергия.
Руководитель одобряет!



Почти так же сталкиваются бильярдные шары. Правда, в этом случае часть кинетической энергии уходит на

ВРАЩЕНИЕ

шара, но об этом — в следующей главе...

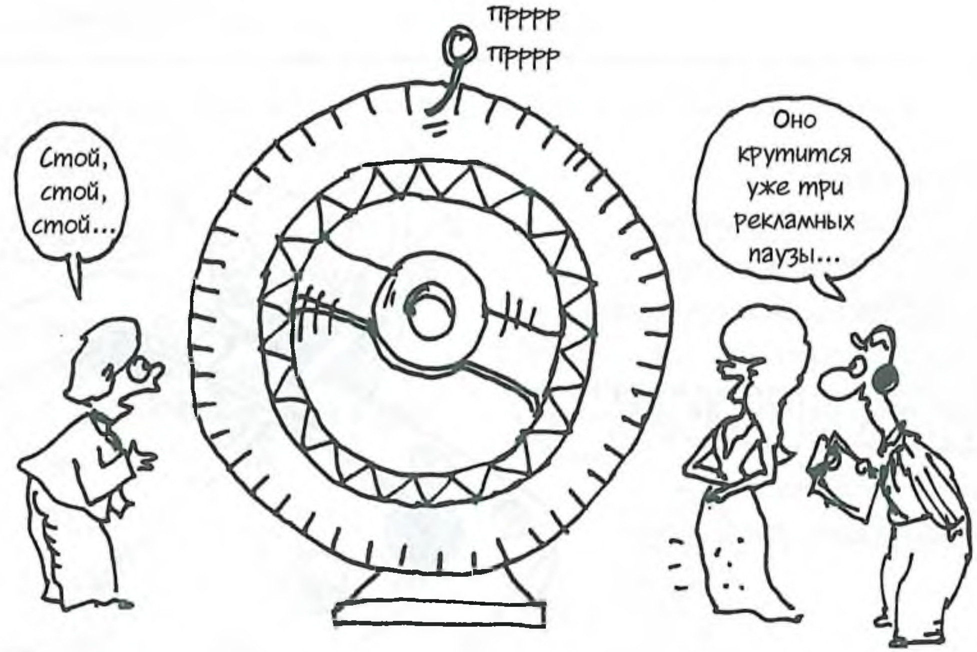
ГЛАВА 11

ВРАЩЕНИЕ

Все мы понимаем, что любой массивный предмет, например барабан в телеигре «Колесо фортуны», обладает

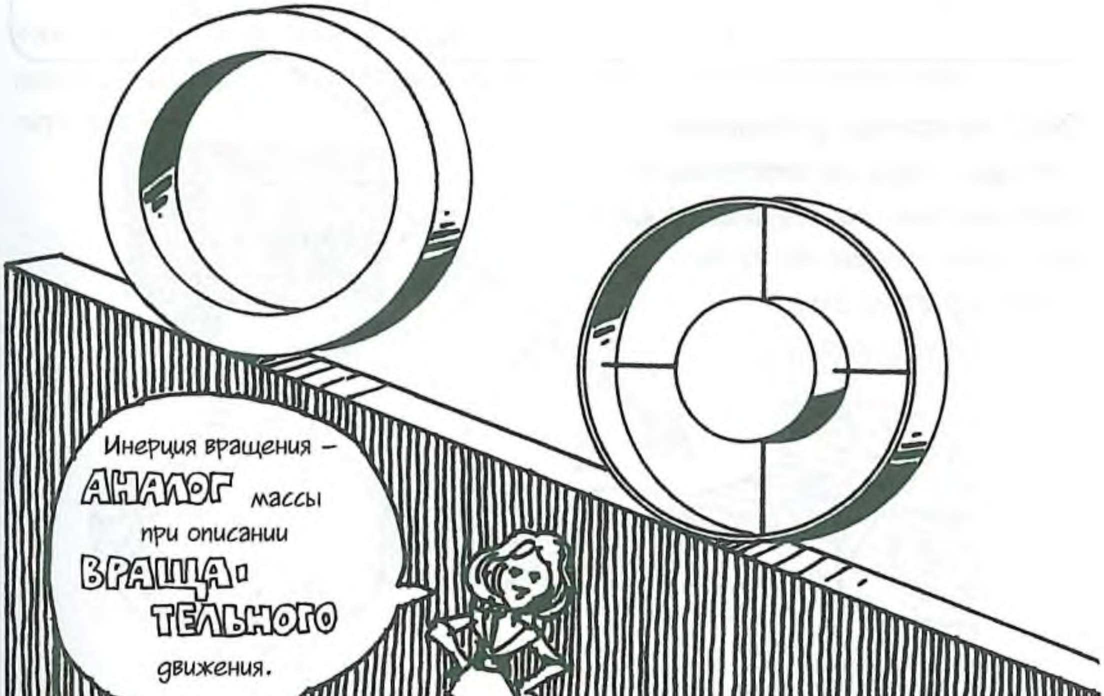
ИНЕРЦИЕЙ ВРАЩЕНИЯ.

Его тяжело раскрутить, а когда он наконец приходит в движение, то долго крутится, пока не остановится под действием трения. Обычная инерция препятствует ускорению, а инерция вращения — угловому ускорению.

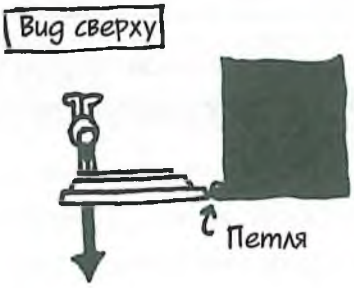


Наверное, ты догадываешься, что инерция вращения зависит не только от массы, но и от того, как эта масса распределена. Чем дальше масса от центра, тем больше ее инерция вращения!

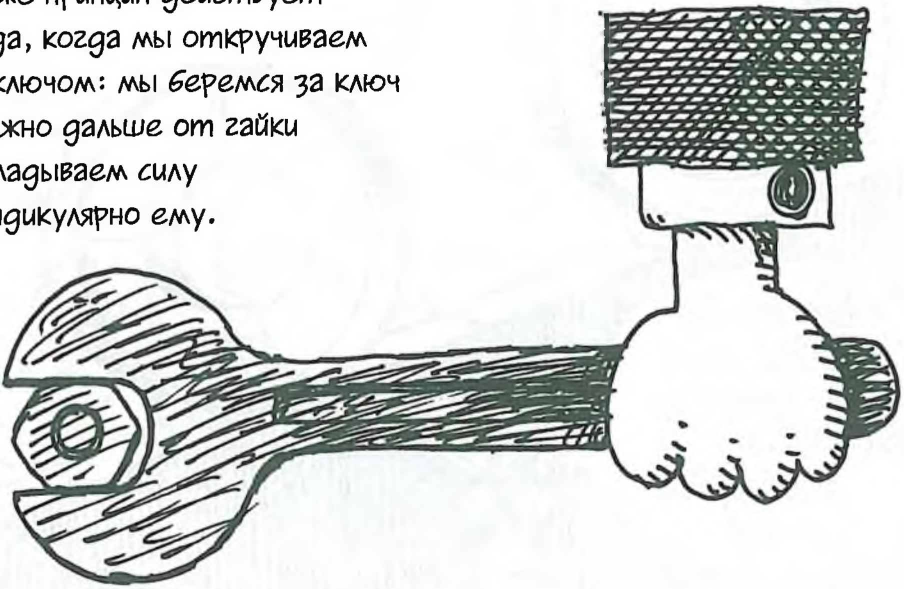
Давай скатим колесо с тяжелым ободом и колесо с тяжелой ступицей с наклонной плоскости. Второе колесо быстро вырвется вперед, так как раскрутить его легче, чем первое.



Если инерция вращения — аналог массы, то каков аналог **СИЛЫ**? На рисунке Ринго открывает массивную дверь: он взялся как можно дальше от петель и прикладывает силу перпендикулярно двери.

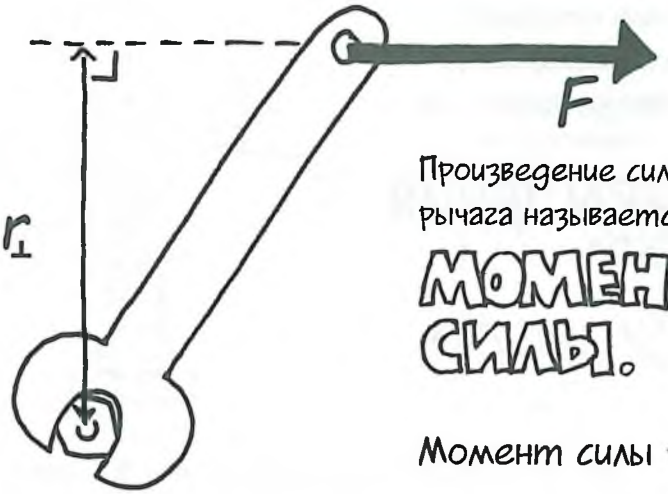


Такой же принцип действует и тогда, когда мы откручиваем гайку ключом: мы беремся за ключ как можно дальше от гайки и прикладываем силу перпендикулярно ему.



Величина $r_\perp$ — длина перпендикуляра от точки вращения до линии приложения силы — называется

ПЛЕЧОМ РЫЧАГА.



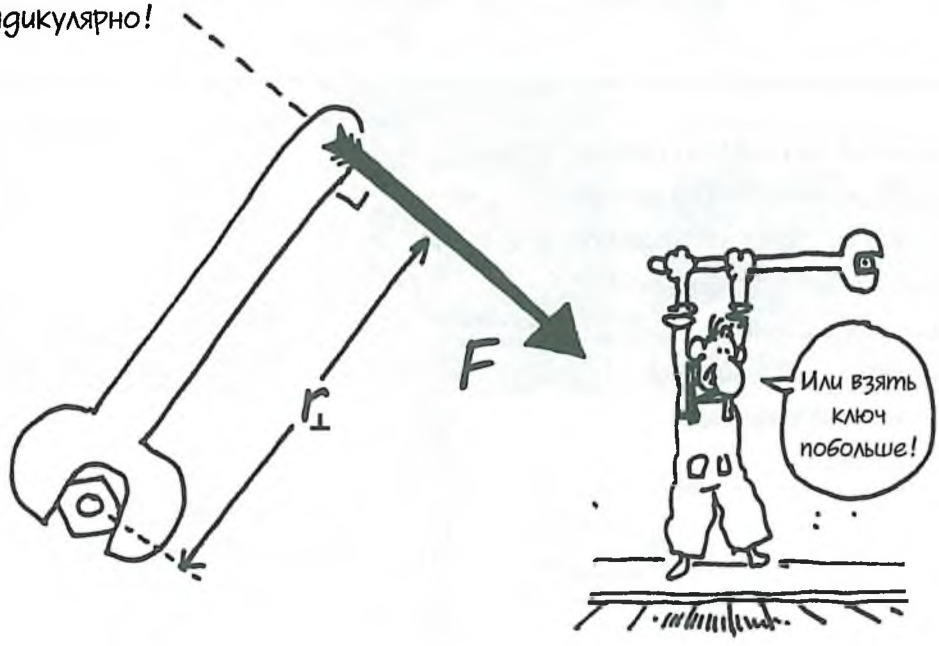
Произведение силы на плечо рычага называется

МОМЕНТОМ СИЛЫ.

Момент силы = $F \cdot r_\perp$

Это аналог силы при описании вращения.

Заметь, что если сила F перпендикулярна радиусу (ключу), то $r_\perp$ будет наибольшим. Другими словами, эффективнее всего приложить силу перпендикулярно!



Последнее понятие, применяемое при описании вращения, — это

МОМЕНТ ИМПУЛЬСА.

По аналогии с линейным импульсом (произведением массы и скорости) момент импульса определяется так:

ИНЕРЦИЯ ВРАЩЕНИЯ

×

УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ

(Угловая скорость — это скорость вращения. Ее можно выразить в оборотах в секунду.)

В отличие от массы, инерция вращения может меняться «на лету», если масса перераспределяется. Из-за этого вращательное движение сложнее линейного. Рассмотрим, например, вращение фигуристки...

Вспомни: в отсутствие внешних сил импульс сохраняется. Так и **МОМЕНТ ИМПУЛЬСА** сохраняется в отсутствие внешних **МОМЕНТОВ СИЛ**.

В этом отношении фигуристка напоминает коллапсирующую звезду: их моменты импульса сохраняются!

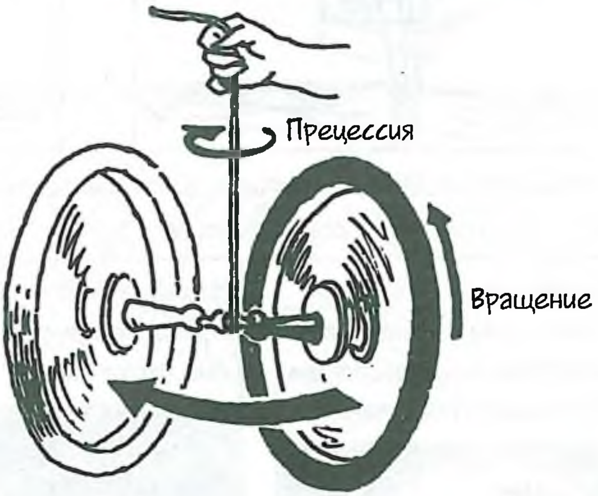
большая инерция вращения × малая скорость вращения

=

малая инерция вращения × большая скорость вращения

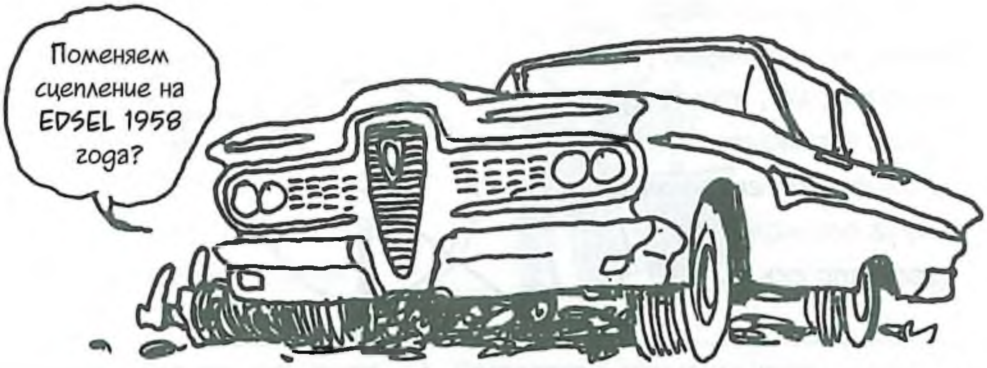
Вращательное движение таит в себе немало сюрпризов. Вот велосипедное колесо, подвешенное за один конец оси. Разумеется, оно падает набок...

... а если быстро вращается, то не падает, а **ПРЕЦЕССИРУЕТ**! Это значит, что ось колеса вращается в горизонтальной плоскости.



Еще один пример — юла. Под действием силы тяготения она не падает, а прецессирует. А под действием момента силы, возникающего из-за притяжения Луны, прецессирует земная ось: она делает один оборот в 26 000 лет.

Давай устроим итоговую проверку наших знаний механики.

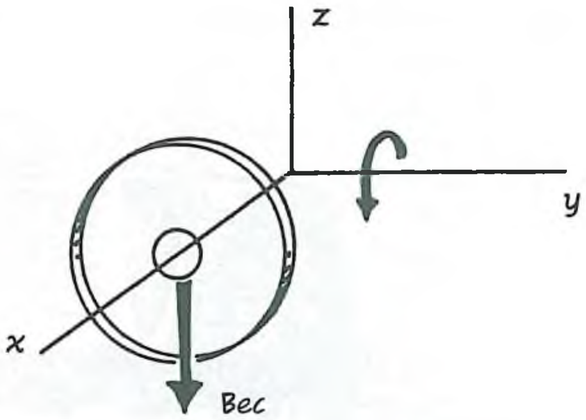


Нет, мы попробуем разобраться, что такое прецессия. Но сначала — одно замечание о линейном движении. Представь, что тело находится в покое и на него действует сила. Тело начинает ускоряться в направлении действия силы.

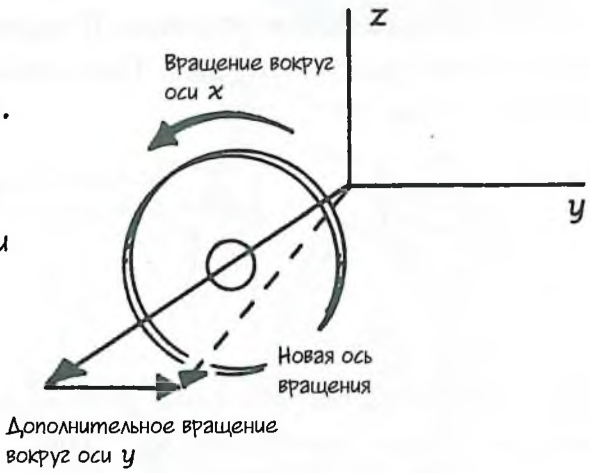
Но если тело уже движется, а сила действует под прямым углом к направлению движения, получится **РАВНОМЕРНОЕ КРУГОВОЕ ДВИЖЕНИЕ**.

Сила «скругляет» направление скорости, но не меняет ее величину.

Нечто похожее происходит и при вращении: когда колесо не крутится, момент силы, производимый весом, вызывает угловое ускорение колеса вокруг оси момента — здесь это ось y.



Но если колесо вращается вокруг оси x, у него уже есть момент импульса. Момент силы добавляет частичное вращение вокруг оси y, перпендикулярной оси вращения x. Итоговая ось вращения будет повернута немного в сторону в плоскости xy.

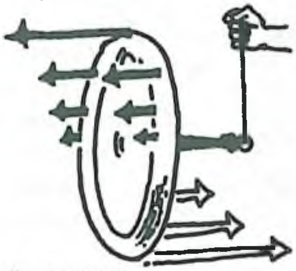


Момент силы всегда действует перпендикулярно оси вращения, поэтому прецессия не прекращается. Здесь, как и при линейном движении, изменяется направление, но не скорость движения.

ЯСНО?

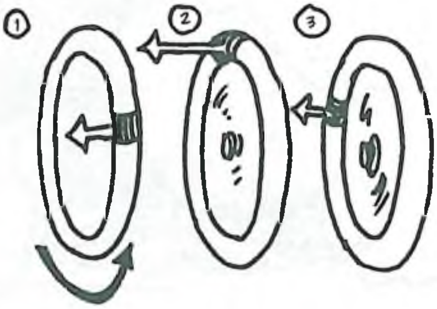
В рассуждениях на предыдущей странице мы применили понятия момента силы и момента импульса. Они, по сути, следуют из второго закона Ньютона $F = ma$. Посмотрим, можно ли объяснить прецессию одним этим законом.

Под действием момента силы тяжести колесо стремится опрокинуться. Значит, на верхнюю половину колеса действует сила, направленная наружу, а на нижнюю половину — сила, направленная внутрь.



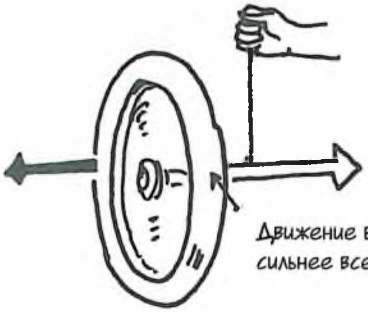
Силы, действующие на колесо

Рассмотрим вращение части колеса. В верхней половине колеса на нее действует сила, направленная наружу.



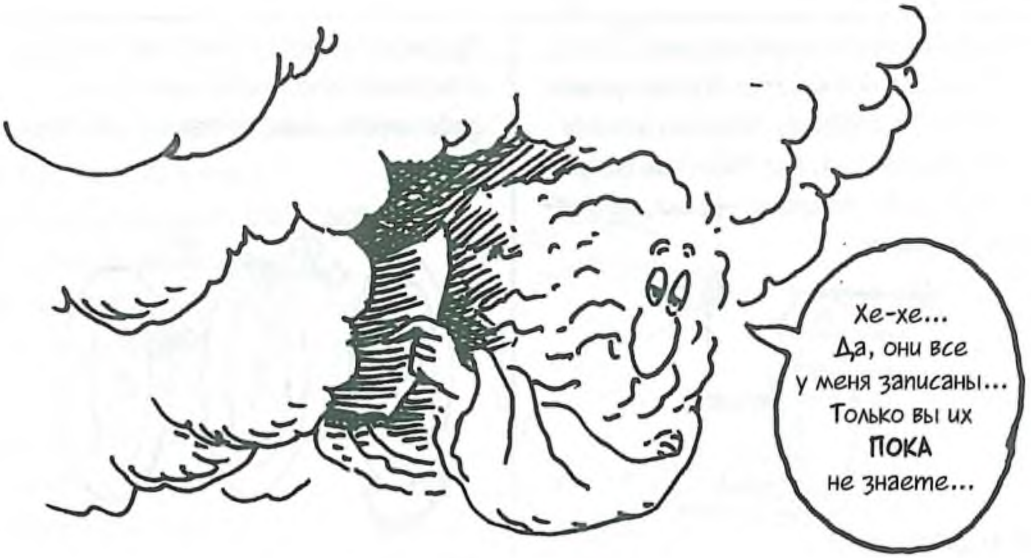
Значит, эта часть ускоряется **НАРУЖУ** и достигает максимальной скорости на границе между верхней и нижней половиной колеса.

Максимальной скорости, направленной **ВНУТРЬ**, она достигнет в точке перехода из нижней части в верхнюю.

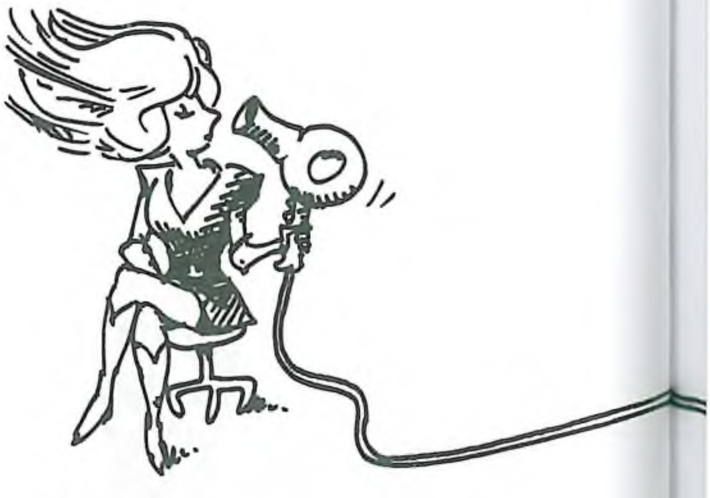


Поэтому колесо не падает, а прецессирует!

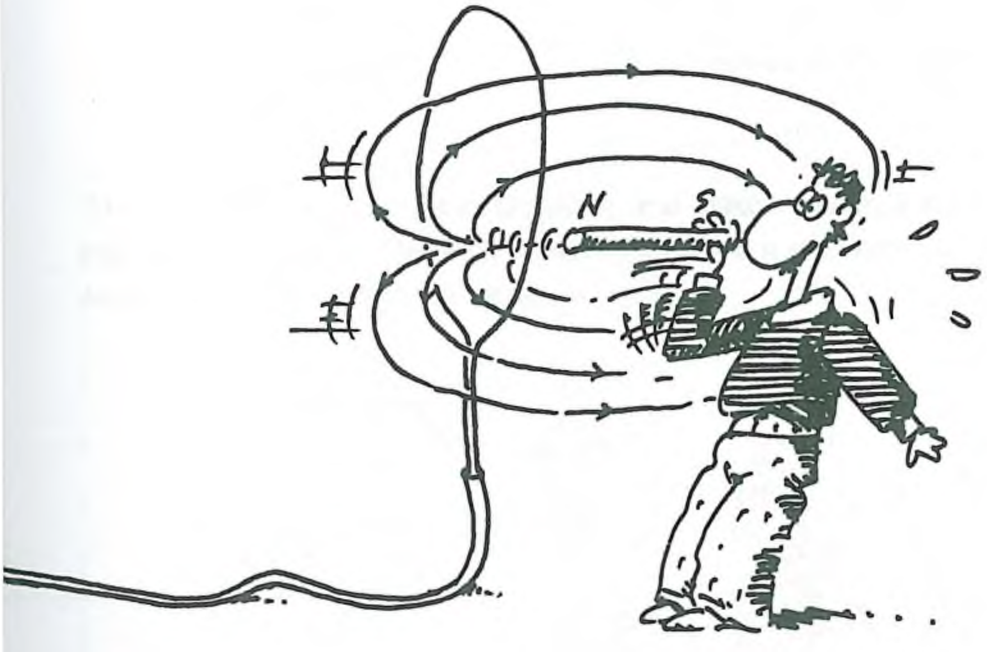
Я так долго объяснял прецессию только для того, чтобы показать, какие сложные задачи помогает решить простое уравнение **$F = ma$.** В этом смысле физика поистине удивительна. Кто знает, может, в будущем мы **СУМЕЕМ** свести всю физику Вселенной к одной странице уравнений!



Куда же я подевал этот список?



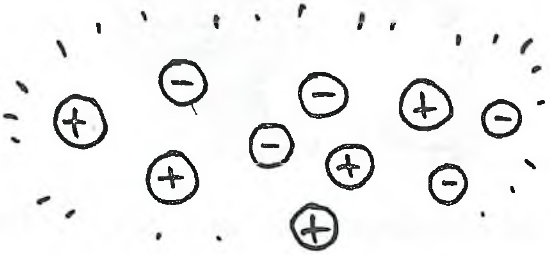
• ЧАСТЬ ВТОРАЯ •
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ



ГЛАВА 12
ЗАРЯД

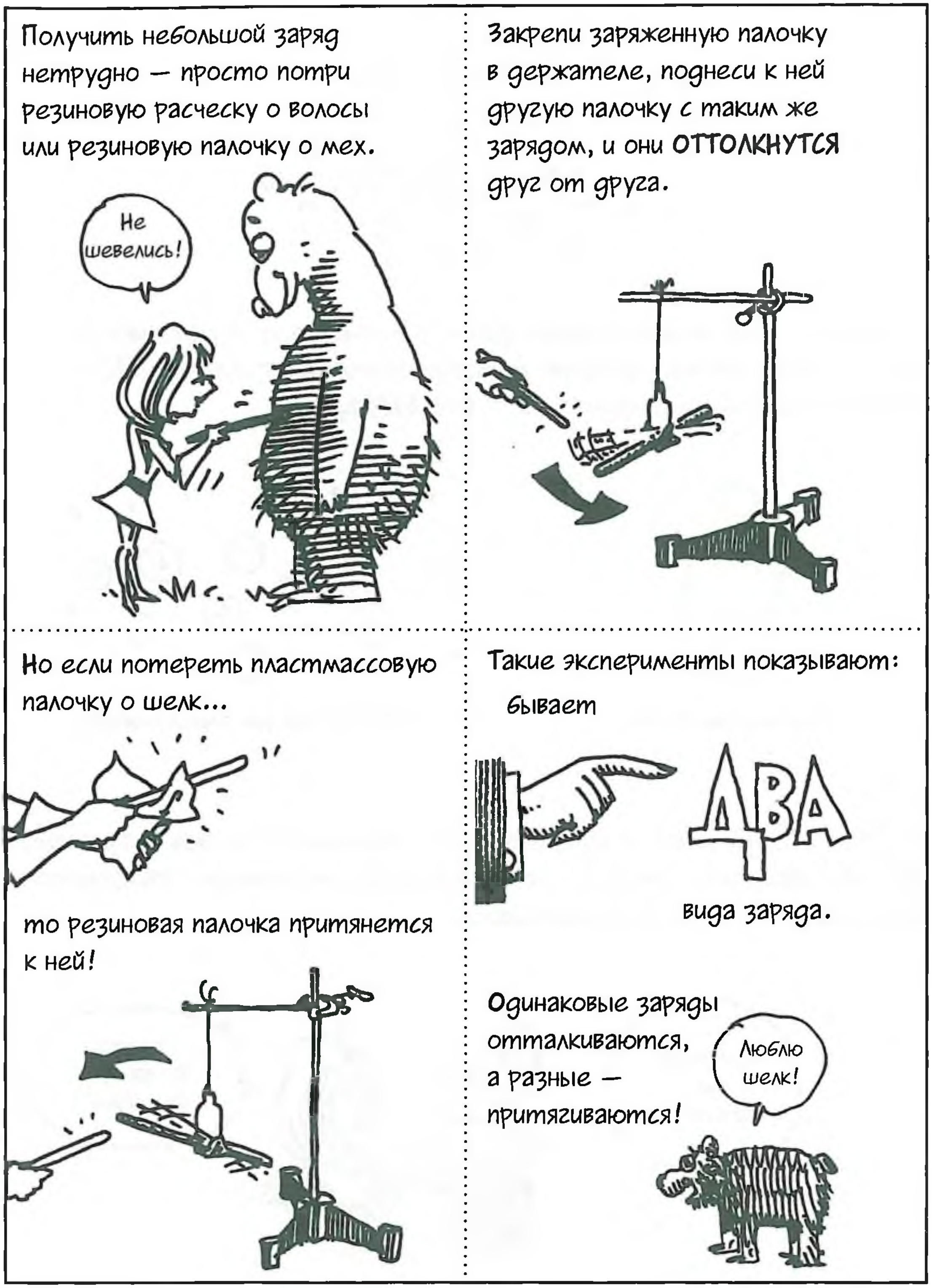
Перейдем от механики к электричеству и магнетизму. В механике мы рассмотрели основное свойство материи, которое называется **МАССА**. Основное понятие электричества — это **ЗАРЯД**.

Понятие механики



Понятие теории электричества

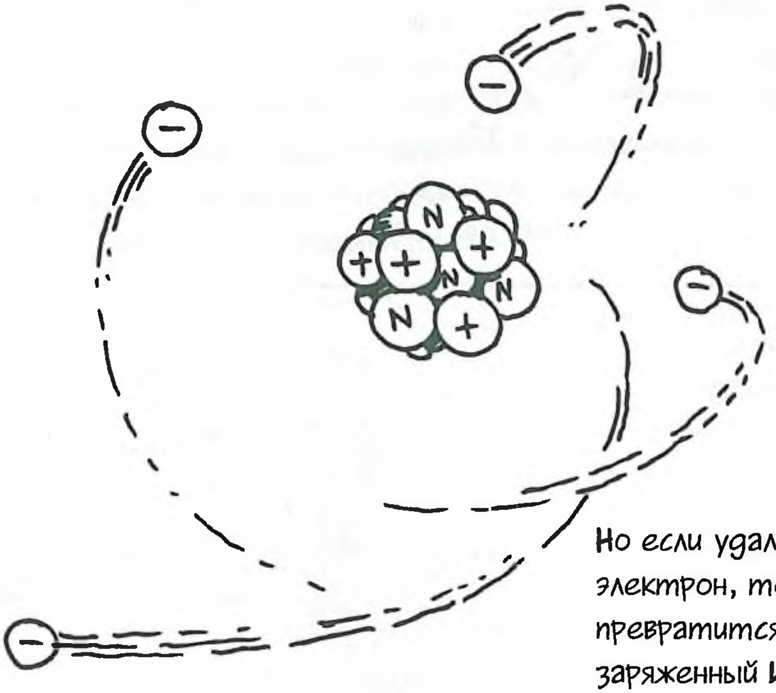
Заметь, что механика не объясняет, что такое масса, а лишь указывает, как она себя ведет. Так же и в электричестве и магнетизме объясняется лишь поведение зарядов, а не их смысл.


Получить небольшой заряд нетрудно — просто потри резиновую расческу о волосы или резиновую палочку о мех.
Не шевелись!
Закрепи заряженную палочку в держателе, поднеси к ней другую палочку с таким же зарядом, и они ОТТОЛКНУТСЯ друг от друга.
Но если потереть пластмассовую палочку о шелк...
то резиновая палочка притянется к ней!
Такие эксперименты показывают:
бывает
ДВА
вида заряда.
Одинаковые заряды отталкиваются, а разные — притягиваются!
Люблю шелк!

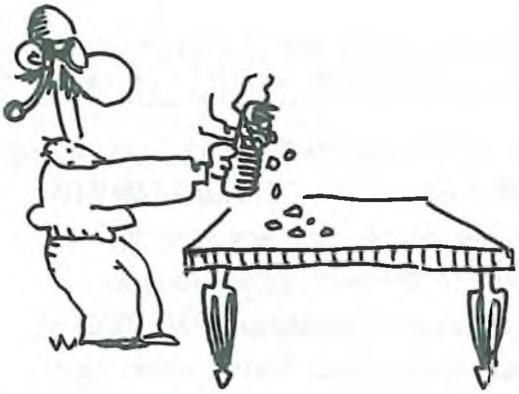
БЕНДЖАМИН ФРАНКЛИН

(1706–1790) назвал эти два вида заряда **ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ** и **ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ**. Теперь мы знаем, что вся материя состоит из атомов, содержащих отрицательно заряженные **ЭЛЕКТРОНЫ**, которые вращаются вокруг ядра. Ядра атомов состоят из положительно заряженных **ПРОТОНОВ** и **НЕЙТРОНОВ**, не имеющих заряда.

Заряды электронов и протонов равны по величине и противоположны. В нормальных атомах электронов ровно столько, чтобы компенсировать заряд протонов в ядре. Получается, что атом не имеет заряда.



Но если удалить из атома электрон, то атом превратится в положительно заряженный **ИОН**.



Заряженный предмет притягивает нейтральные предметы. Резиновая расческа, заряженная отрицательно о волосы Ринго, притягивает кусочки бумаги.

Это происходит потому, что бумага

ПОЛЯРИЗУЕТСЯ:

отрицательно заряженная расческа отталкивает электроны и притягивает положительно заряженные ядра атомов в кусочках бумаги. Происходит смещение заряда! В целом кусочек бумаги нейтрален...

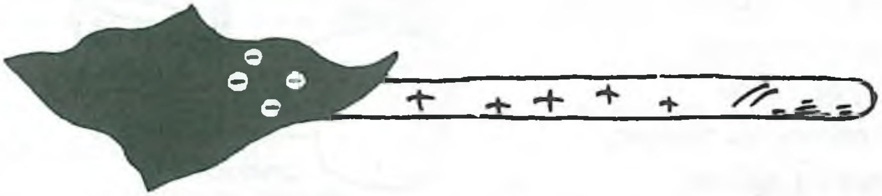
... но положительный заряд оказывается ближе к расческе, чем отрицательный. В результате положительный заряд притягивается к ней сильнее, чем отрицательный заряд отталкивается от нее!

Из этих наблюдений можно сделать вывод: электрическая сила

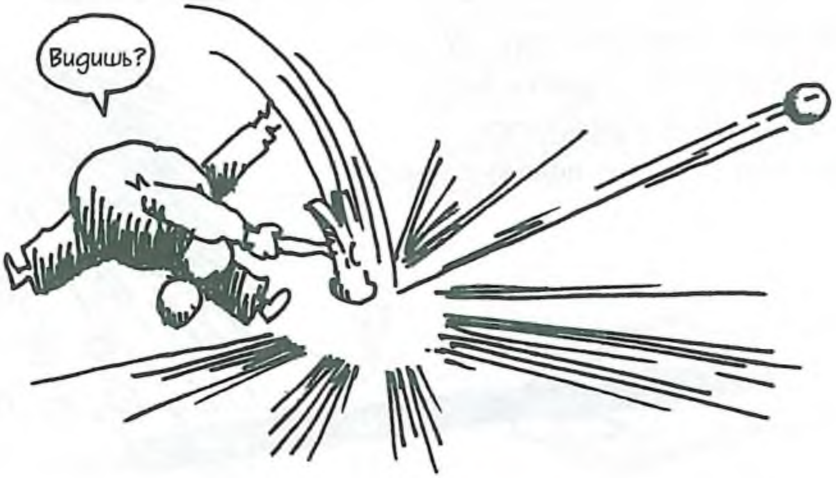
ОСЛАБЕВАЕТ С УВЕЛИЧЕНИЕМ РАССТОЯНИЯ.

Если потереть резиновую палочку о мех, часть электронов перейдет с меха на палочку, и палочка зарядится отрицательно (а мех — положительно).

Точно так же часть электронов переходит с пластмассы на шелк, и пластмасса приобретает положительный заряд.



Заряд электрона — это элементарный электрический заряд. Он легко распространяется между предметами или внутри одного и того же предмета, например в медной проволоке.



Такие материалы, как резина, стекло и пластмасса, называются

ИЗОЛЯТОРАМИ:

их поверхности можно придать заряд, но он не распространится дальше, а останется на месте.

В металлах, например в меди, серебре и алюминии, электроны движутся легко и свободно. Металлы —

ПРОВОДНИКИ

электричества, а то, что мы называем «электричеством», — всего лишь поток электронов.

ШАРЛЬ КУЛОН

(1736–1806), проведя измерения, определил: электрическая сила, точно как тяготение, убывает пропорционально квадрату расстояния. Закон Кулона для электростатического* взаимодействия очень похож на закон тяготения Ньютона:

$$F = k\frac{Qq}{r^2}$$

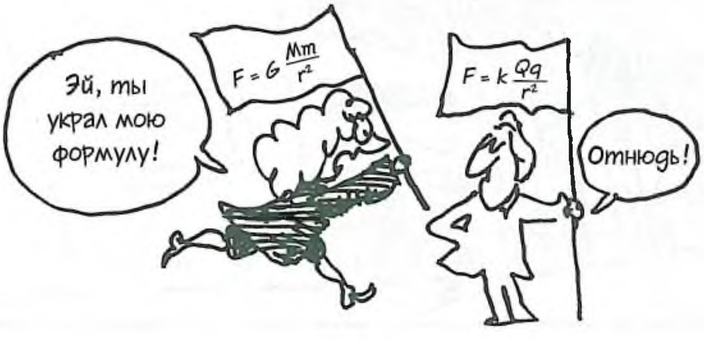
* «Электростатический» означает, что заряды неподвижны.

В уравнении Кулона Q и q — заряды, r — расстояние между ними, k — постоянная, похожая на G в законе тяготения. В стандартных единицах $k = 9 \times 10^9$.

Единица измерения заряда называется

КУЛОН.

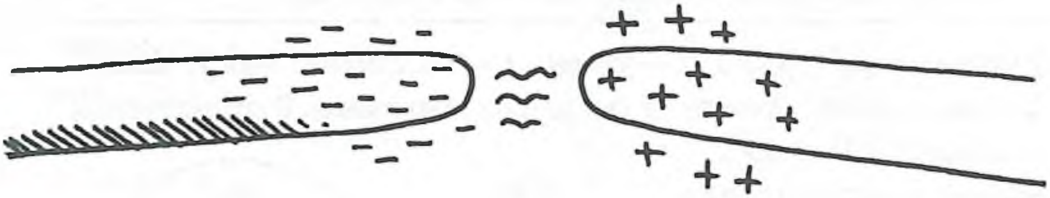
Заряд электрона равен $e = -1{,}6 \times 10^{-19}$ кулона.



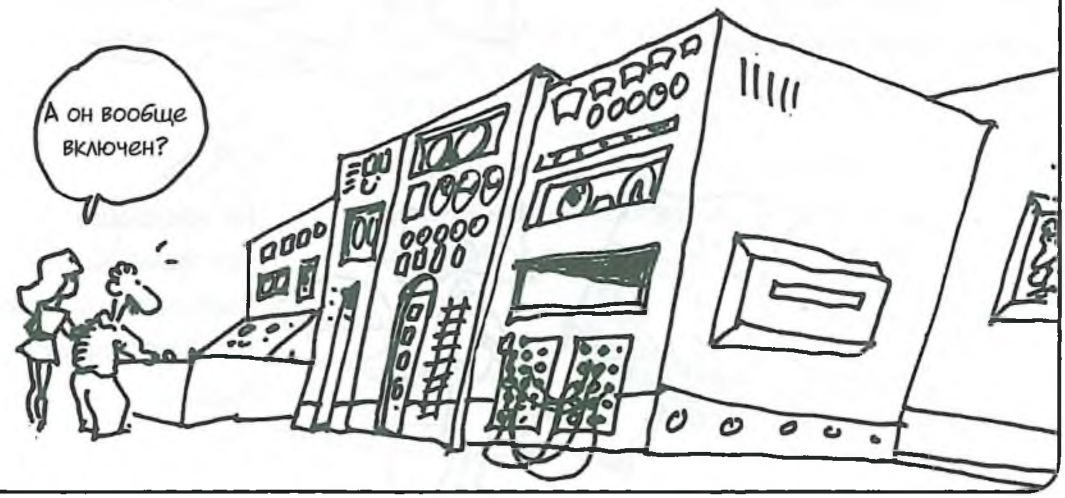
Но насколько похожи сила тяготения и электростатическая сила?

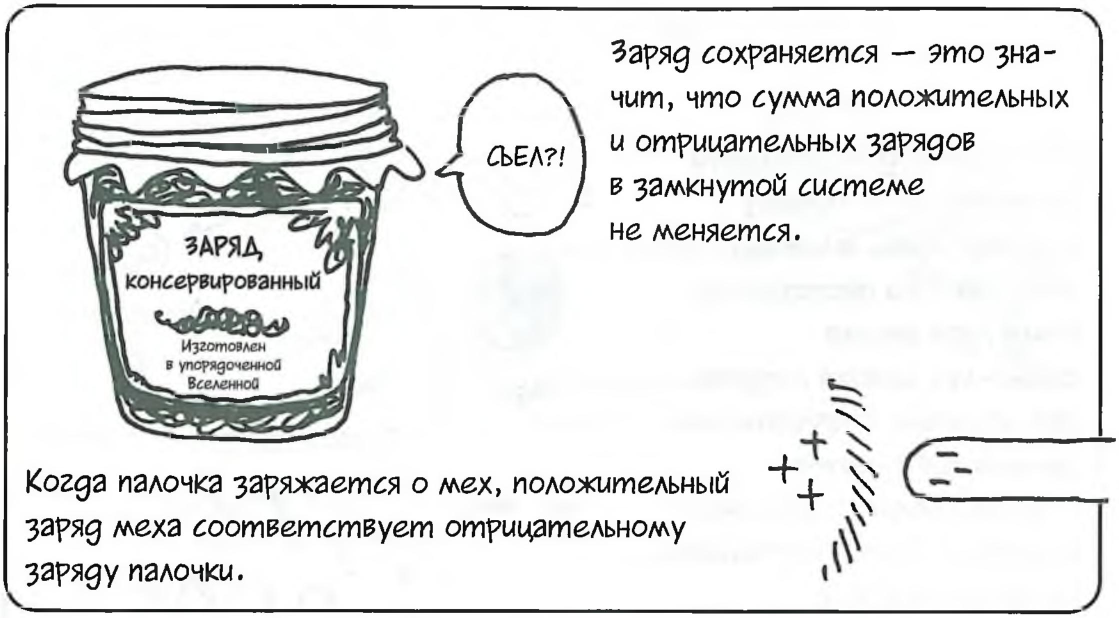
Хотя закон электростатического взаимодействия очень похож на закон всемирного тяготения, между ними есть важные отличия. К примеру, тяготение всегда означает притяжение, а заряды могут как притягиваться, так и отталкиваться.

Кроме того, электрические силы намного больше сил тяготения. Если переместить всего сто миллиардов электронов с пластмассовой палочки на резиновую, то между ними возникнет заметная сила притяжения.



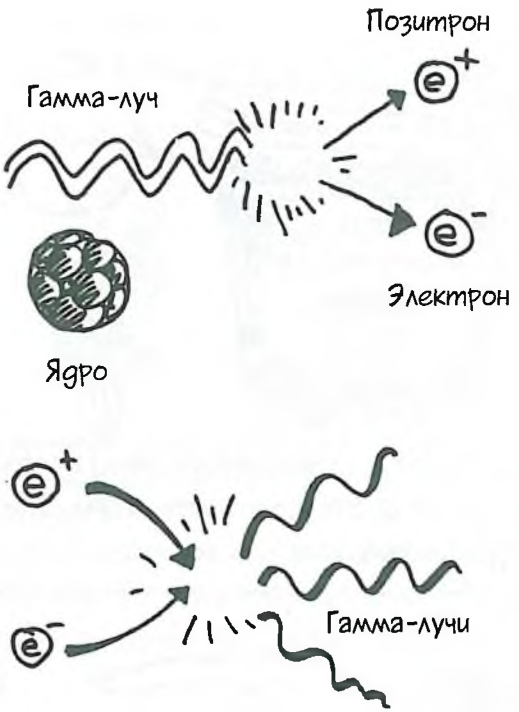
А силу тяготения от всех 10^{24} (10^{15} миллиардов) атомов в палочке не могут обнаружить даже самые чувствительные приборы!




Заряд сохраняется — это значит, что сумма положительных и отрицательных зарядов в замкнутой системе не меняется.
ЗАРЯД консервированный
Изготовлен в упорядоченной Вселенной
СЪЕЛ?!
Когда палочка заряжается о мех, положительный заряд меха соответствует отрицательному заряду палочки.

Но:
ПАРЫ ЗАРЯДОВ МОЖНО СОЗДАВАТЬ ИЗ НИЧЕГО!!!
«Из ничего», то есть из энергии!

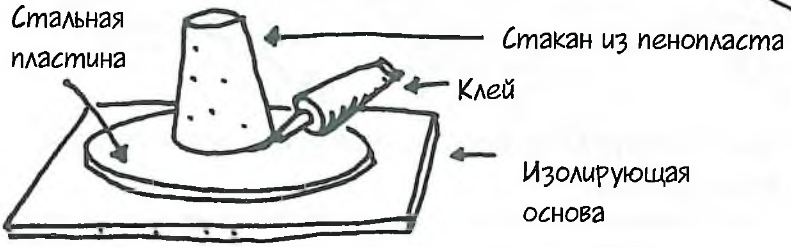
Это происходит благодаря гамма-лучам — потоку частиц с очень высокой энергией. При прохождении возле ядра атома гамма-луч может создать две частицы: отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный позитрон. При их столкновении образуются новые гамма-лучи.



Нам неизвестен ни один физический процесс, позволяющий создать или уничтожить один непарный заряд!

В домашних условиях можно изготовить прибор для получения электричества под названием

ЭЛЕКТРОФОР

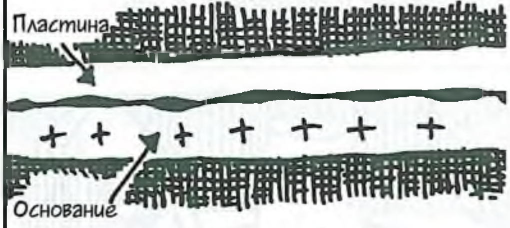


Тебе понадобится пластмассовый лист (для основания) и круглая стальная пластина с приклеенной к ней изолирующей ручкой — например стаканом из пенопласта.

У этого эксперимента есть интересная особенность: пластину можно перезарядить, прикоснувшись к ней пальцем, и натирать основание при этом будет не нужно.

Почему так происходит? Откуда берется энергия искры, если заряд основания почти не расходуется?

Натирая основание, мы заряжаем его положительно. Когда мы кладем на него пластину, она соприкасается с ним лишь в нескольких местах:



Так как основание — изолятор, на пластину перетекает мало заряда. Когда ты касаешься пластины, электроны из твоего тела притягиваются к положительному основанию, перетекают на пластину, и она заряжается отрицательно.

Твое тело действует как **ЗАЗЕМЛЕНИЕ** — хранилище положительных и отрицательных зарядов. Так как пластина получает заряд от твоего тела, эксперимент можно повторять бесконечно.

Откуда берется энергия искры?

Ее источник — сила, которую мы прикладываем, чтобы оторвать отрицательно заряженную пластину от положительно заряженного основания!

ГЛАВА 13
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

Земля притягивает Луну, хотя их разделяет много тысяч километров пути. Так и электрический заряд действует на заряды, расположенные далеко от него.

Как один предмет может действовать на другой, которого он не касается? Как сила может преодолевать пространство? Как быстро она перемещается?

Чтобы ответить на эти вопросы, представим, что Земля наполняет пространство

ГРАВИТАЦИОННЫМ ПОЛЕМ.

Это поле (что бы это ни значило!), которое действует с силой на тела внутри его.

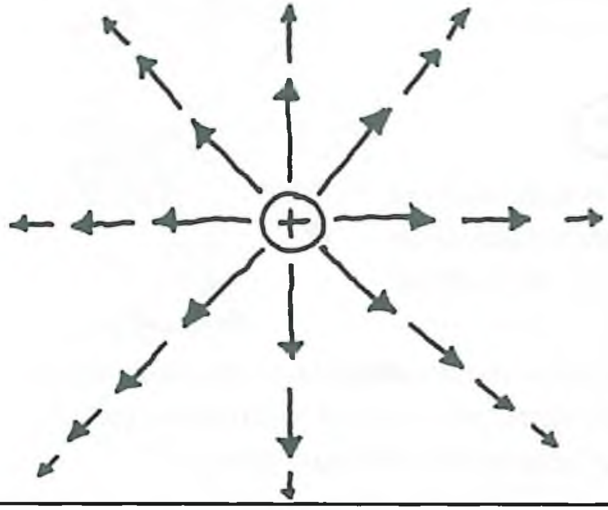
Так и заряд наполняет пространство

ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ.

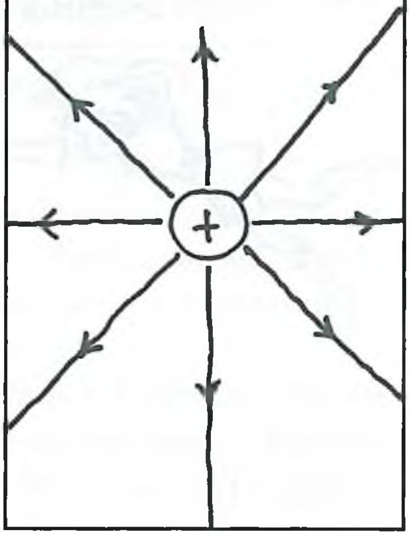
Если в электрическом поле находится другой заряд, на него действуют электрические силы!

Чтобы изобразить электрическое поле, представь, что мы несем пробный положительный заряд и отмечаем, в каком направлении на него действует сила. На рисунке Ринго держит положительный заряд, а я ношу пробный заряд вокруг него.

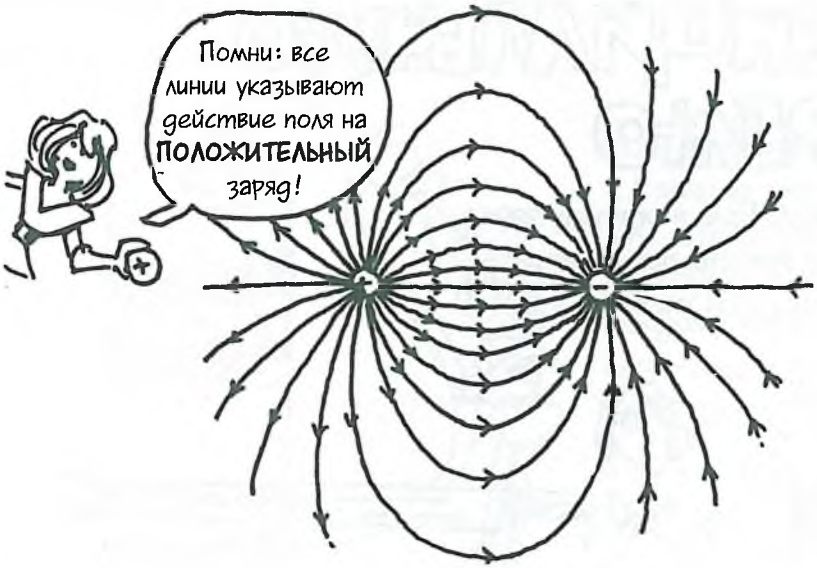
Обозначив стрелками направление действия силы (длина стрелок пропорциональна величине силы), мы сможем увидеть электрическое поле заряда Ринго:



А если мы соединим стрелки **СИЛОВЫМИ ЛИНИЯМИ**, получится вот что:

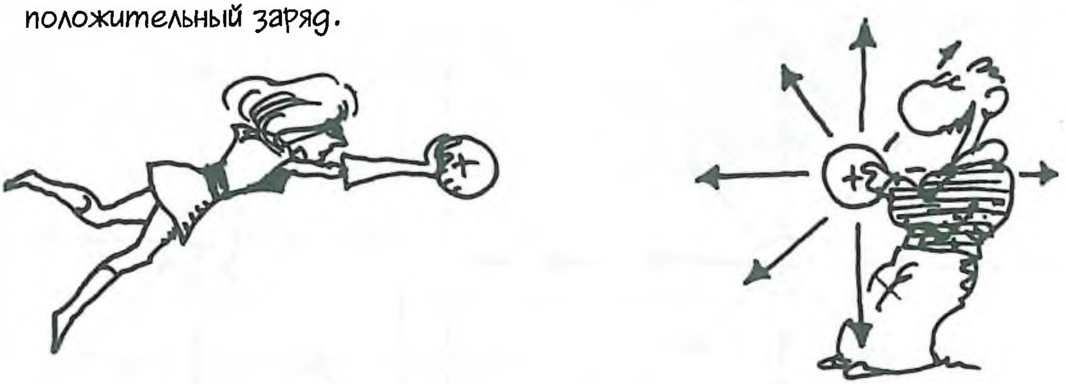


Силовые линии помогают наглядно представить электрическое поле. Вот пример с двумя притягивающимися зарядами:



Силовые линии выходят из положительного заряда и входят в отрицательный. Отрицательный заряд притягивает пробный положительный заряд, где бы тот ни находился.

Так как электрическое поле действует на заряды с силой, положению частицы в поле соответствует определенная энергия. На рисунке Ринго держит положительный заряд, а я подхожу к нему, держа в руках пробный положительный заряд.

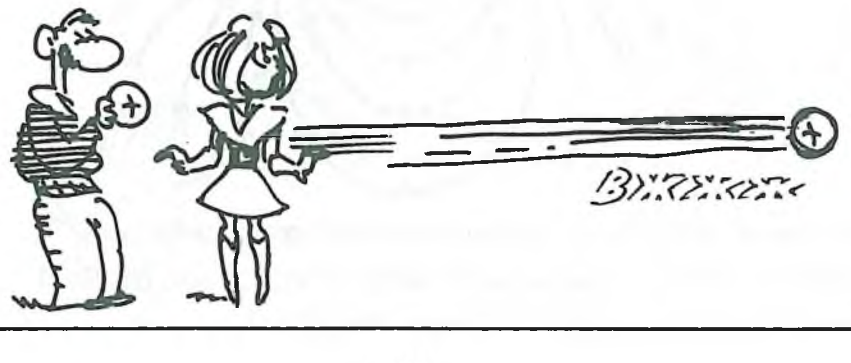


По мере приближения пробный заряд отталкивается, и его приходится толкать с некоторой силой. Произведение силы на расстояние равно **РАБОТЕ** — я совершаю работу над пробным зарядом.

Говорят, что работа переходит в

ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ

пробного заряда. Если я отпущу заряд, потенциальная энергия перейдет в кинетическую, и он улетит.



Хотелось бы выразить потенциальную энергию только через электрическое поле заряда Ринго. Разделим ее на величину пробного заряда и запишем:

$$\text{Потенциал} = \frac{\text{потенциальная энергия}}{\text{заряд}}$$

Мы определили новую величину — электростатический потенциал*. Потенциал указывает энергию заряда и измеряется в джоулях на кулон, или в **ВОЛЬТАХ.**

$$1\ \text{вольт} = 1\ \frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}}$$

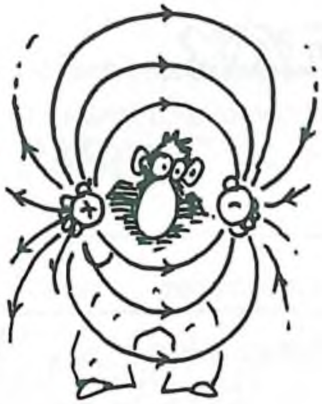
В этом определении, как и в любом другом, важно прежде всего понимать, что же происходит.

Если на батарейке написано «6 вольт», это значит, что она отдает 6 джоулей энергии каждому заряду в 1 кулон, перемещенному между ее полюсами.

* Существует и гравитационный потенциал. Если п.э. = mgh, то величина п.э./m = gh характеризует способность поля тяготения передавать энергию телу массой m на высоте h.

Ну ладно, вот заряд. Но я все равно не понимаю...

...что же такое **ЗАРЯД**? Неужели его просто взяли и придумали?



И что еще за «электрическое поле»?

Как оно может действовать с силой?

Оно «заполняет пространство», как вообще оно может **ДЕЙСТВОВАТЬ?**

Я, КАК ВСЕГДА, ЗАПУТАЛСЯ!

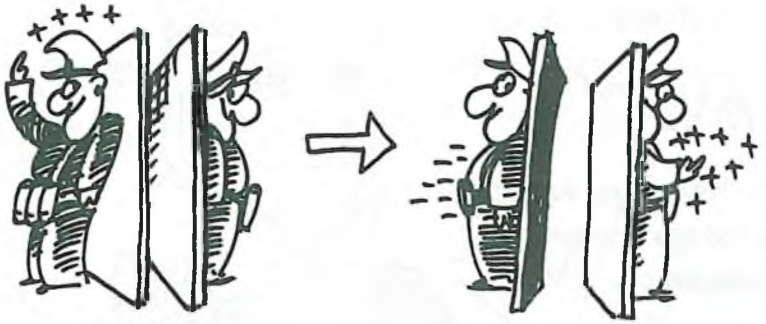
Хмм...

Увы, Ринго, тут ты прав... Классическая теория электричества и магнетизма не дает ответы на эти вопросы — она только описывает поведение зарядов и полей. Потерпи до конца книги — там я немного расскажу о квантовой теории, она-то и объясняет, что такое заряд и поле на самом деле.

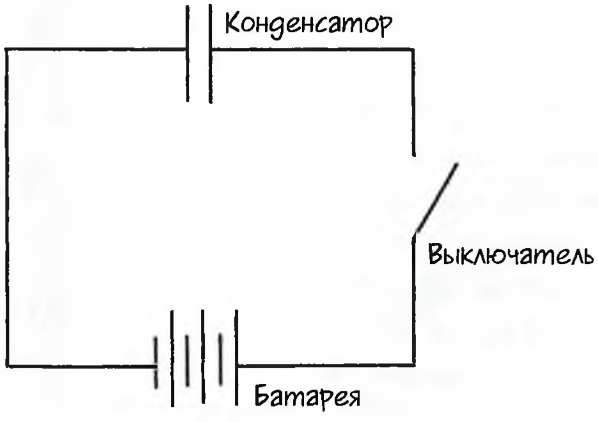
ГЛАВА 14
КОНДЕНСАТОРЫ

Конденсатор состоит из двух проводников, разделенных изолятором, — например из двух металлических пластин, между которыми находится воздух.

Чтобы зарядить конденсатор, нужно убрать часть заряда с одной пластины и поместить на другую пластину.



Для этого проще всего ненадолго подключить конденсатор к батарее — она «перекачает» заряд с одной пластины на другую.



При включении выключателя возникает поток электричества, и на конденсатор поступает заряд. Величина заряда пропорциональна напряжению батареи (в вольтах). Имеем:

$$Q = C \cdot V$$

заряд = постоянная · напряжение

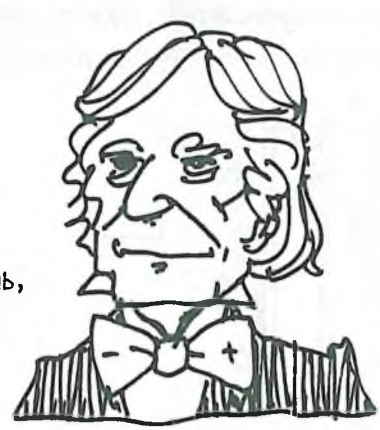
Постоянная C — это число, которое зависит от характеристик конденсатора и называется

ЕМКОСТЬЮ.

Единица емкости называется **ФАРАД**, в честь Майкла

ФАРАДЕЯ

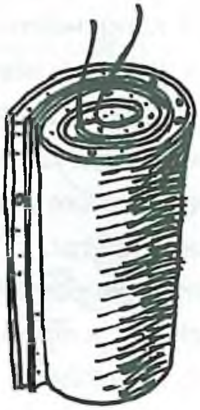
(1791–1867). Чем выше емкость, тем больше заряда может хранить конденсатор.



Емкость, в свою очередь, прямо пропорциональна площади пластин и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Чем больше пластины и чем ближе они друг к другу, тем больший заряд они могут удерживать.

Конденсаторы, применяемые в электронике,

могут быть сделаны из двух алюминиевых пластин, разделенных специальным веществом...

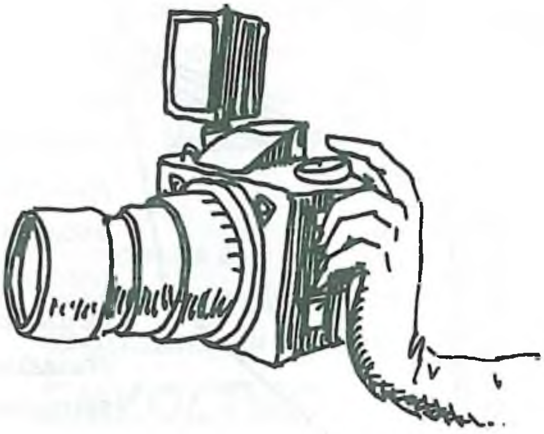


... и свернутых в рулон.

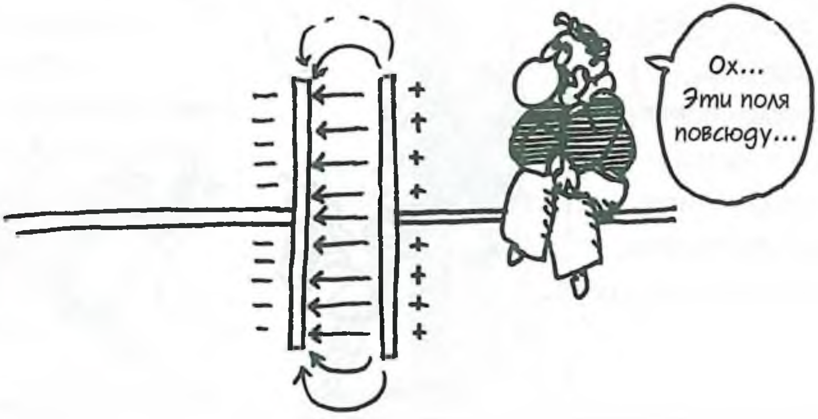
Когда конденсатор заряжен, его можно отключить от батареи, и он сохранит заряд на несколько минут или даже часов. Впрочем, заряд будет медленно теряться.

Если осторожно совместить выводы конденсатора, по проводам потечет заряд, и пластины разрядятся. Этот процесс называется разрядкой конденсатора.

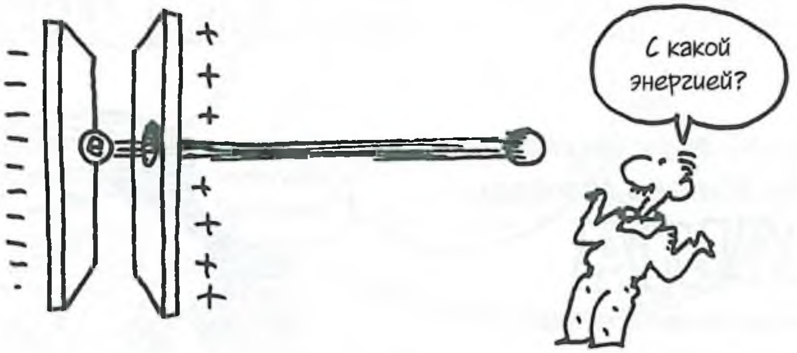
Посмотрим, как можно использовать конденсаторы для хранения заряда и энергии. К примеру, в фотовспышке установлен большой конденсатор, который хранит энергию для импульсной лампы. Он заряжается от батареи около 30 секунд, а потом, когда нужно, мгновенно «сбрасывает» весь заряд на лампу!



При зарядке конденсатора положительные и отрицательные заряды «смотрят» друг на друга и удерживаются по разные стороны изолятора. При этом, разумеется, возникает электрическое поле!

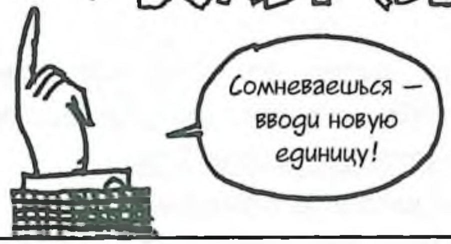


Когда возле отрицательной пластины появляется электрон, под действием поля он ускоряется в сторону положительной пластины. Если проделать в ней небольшое отверстие, то электрон проскочит сквозь него.



Введем новую единицу энергии —

ЭЛЕКТРОН-ВОЛЬТ (эВ)



Это энергия одного электрона, если пластины заряжены до 1 вольта. Если пластины заряжены до 100 вольт, энергия электрона будет равна 100 эВ.

Для перевода эВ в джоули вспомним определение:

потенциал = энергия / заряд

1 эВ = заряд электрона × 1 Вольт =

$= 1{,}6 \times 10^{-19}$ Кл $\times$ 1 Дж/Кл =

$= 1{,}6 \times 10^{-19}$ Дж

(то есть 0,00000000000000000016!)

Современная техника позволяет получать энергию в несколько миллионов электронвольт. При таких энергиях электроны движутся почти со скоростью света, и для их описания нужна теория относительности.

+ ГЛАВА 15 –
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Итальянский физик Алессандро Джузеппе Антонио Анастасио

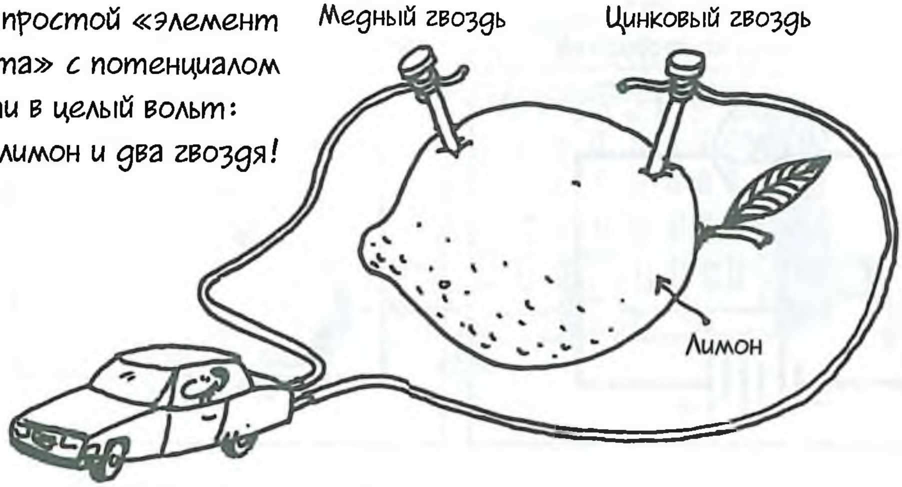
ВОЛЬТА

прославился не только тем, что без запинки выговаривал свое имя, но и тем, что в 1794 году изобрел электрическую батарею.

Вольта обнаружил: если опустить два разных металла в соляную ванну, возникнет разность потенциалов.

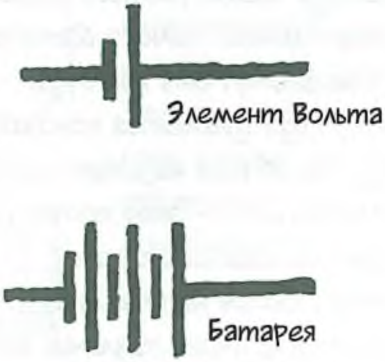
Это значит, что заряд «хочет» перейти с одного металлического стержня на другой. Если соединить их проводом, по нему потечет заряд.

Вот простой «элемент Вольта» с потенциалом почти в целый вольт: это лимон и два гвоздя!

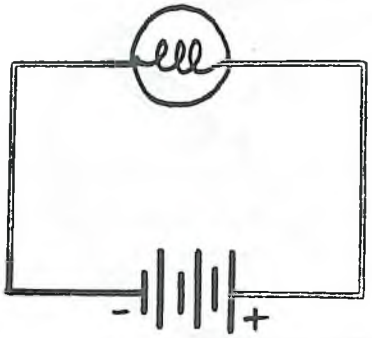


При последовательном соединении их потенциалы складываются, и получается большое напряжение:

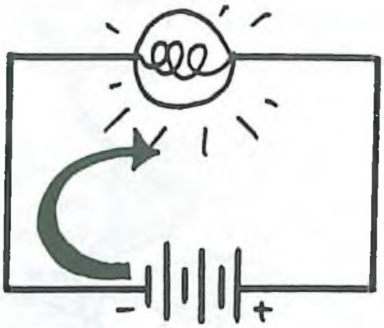
Батарейка в фонарике — это на самом деле один «элемент Вольта». Настоящая батарея, например автомобильная, состоит из нескольких элементов, соединенных последовательно, как на рисунке. Вот их обозначения:



Вот простая цепь: лампочка подключена к батарее проводами.



Батарея непрерывно «перекачивает» заряд по цепи, и лампочка светится.



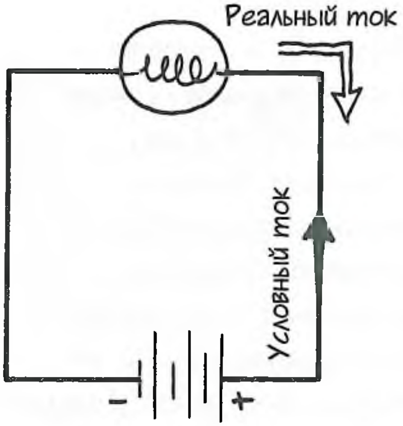
Такой поток заряда называется

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.

Сила тока измеряется в кулонах в секунду, иначе говоря, в

амперах.

Вдоль провода часто рисуют стрелку от положительного полюса батареи к отрицательному. Она как будто бы указывает, куда движется положительный заряд. Такой ток называется условным. Реальный ток — это поток отрицательно заряженных электронов в противоположном направлении. В большинстве случаев различия между условным и реальным током незаметны.



Чтобы не запутаться во всех этих понятиях, рассмотрим пример из механики:

Представь, что электрический ток — это вода в трубе. Тогда выполняются соответствия:

Электричество	Вода
1 кулон заряда	1 литр воды
ампер	1 литр в секунду
батарея	насос
разность потенциалов	давление насоса
провод	труба

Нить накала в лампе похожа на участок трубы, наполненный камнями, который **СОПРОТИВЛЯЕТСЯ** потоку воды. Кстати, при трении о воду камни нагреваются!

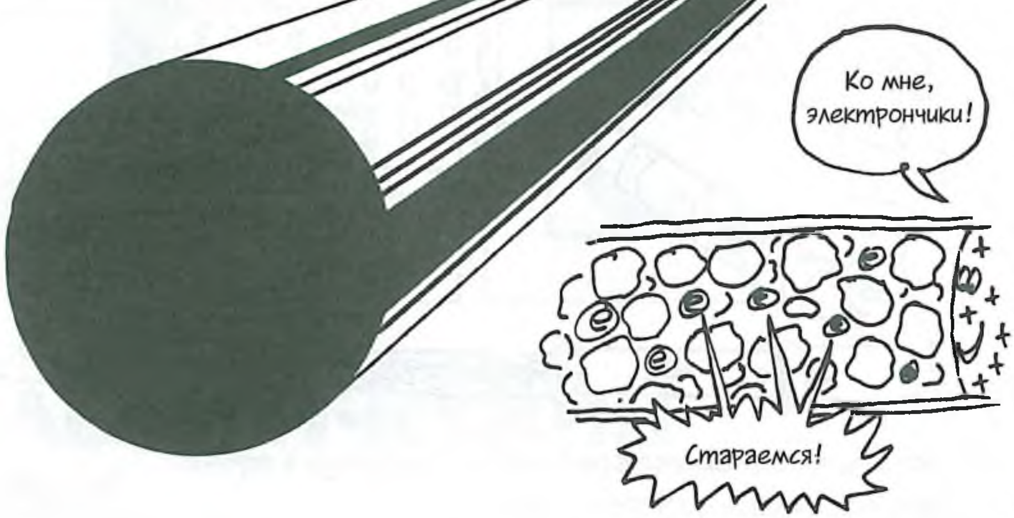
Чтобы получить сильный поток воды или ток, нужно большое давление (высокое напряжение). **ГЕОРГ ОМ** (1789–1854) выразил это в

ЗАКОНЕ ОМА:

Сила тока I равна напряжению U, деленному на сопротивление R. Чем выше напряжение, тем больше сила тока при постоянном сопротивлении.

(Закон Ома, в отличие от закона Кулона, не универсальный, но выполняется во многих случаях.)

Сопротивление измеряется в **ОМАХ** и зависит от материала, площади сечения и расстояния, которое должен пройти ток.



Снова представим поток воды в трубе, наполненной камнями. В трубе двойной длины сопротивление вдвое больше обычного. В широкой трубе сопротивление меньше — в ней больше свободного места, поэтому вода течет свободнее. Кроме того, сопротивление зависит от формы камней.

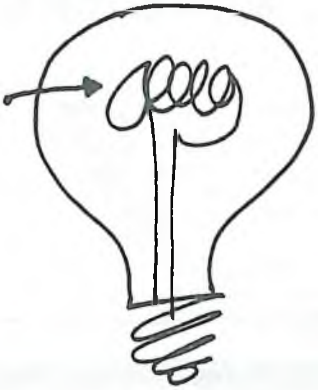
Так и сопротивление провода пропорционально его длине и обратно пропорционально площади его поперечного сечения.

Разные материалы, как и разные виды камней, имеют разное **УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ**. У хороших проводников удельное сопротивление небольшое.

Хорошие проводники с низким удельным сопротивлением: серебро, золото, медь, алюминий.

Плохие проводники с высоким удельным сопротивлением: пластмасса, бумага, ткань.

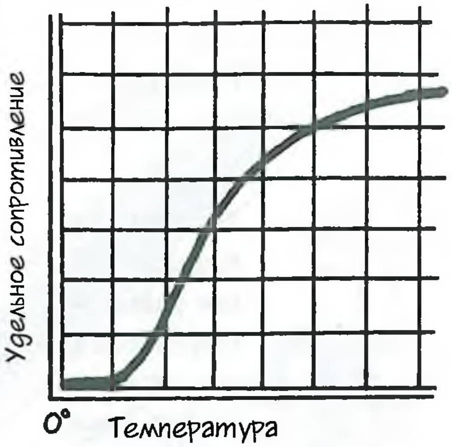
Нити накала в лампочках чаще всего делают из **ВОЛЬФРАМА**. Его удельное сопротивление намного больше, чем у меди, значит, сопротивление по сравнению с медным проводом того же размера будет выше.



Нить накала должна иметь большое сопротивление, чтобы «рассеивать» электрическую энергию в виде света.

Удельное сопротивление зависит и от температуры. Для большинства материалов оно медленно возрастает при нагреве, так как колебания молекул препятствуют потоку зарядов.

У некоторых металлов, например ртути и алюминия, при очень низких температурах удельное сопротивление падает до **НУЛЯ.**



Вблизи абсолютного нуля (−273° по Цельсию) эти металлы проводят электричество без сопротивления, поэтому они называются

СВЕРХПРОВОДНИКИ.

Замечательнее всего то, что сверхпроводники могут проводить огромные токи, не расходуя энергию в виде тепла. Эти токи могут сохраняться несколько лет без потерь энергии. Сверхпроводники очень дорогие и применяются в ускорителях частиц, где для сверхмощных электромагнитов нужны огромные токи.

В 1986 году ученые открыли несколько новых сплавов, обладающих сверхпроводимостью при более высоких температурах — около –180 °C. По сравнению с абсолютным нулем — просто теплая ванна!

Эти сплавы можно охладить недорогим жидким азотом. Может быть, через несколько лет мы увидим результаты их использования на практике — например поезда на магнитной подушке.

Вернемся к нашей простой цепи — маленькой лампочке, подключенной к 6-вольтовой батарее медным проводом.

Пусть нить накала лампы имеет сопротивление 6 ом. Тогда, по закону Ома, сила тока равна:

$$I = U/R = \frac{6\ \text{вольт}}{6\ \text{ом}} = 1\ \text{ампер}$$

Сопротивление медного провода очень мало — меньше 1/100 ома, поэтому им можно пренебречь*.

Но как измерить эти величины в цепи?

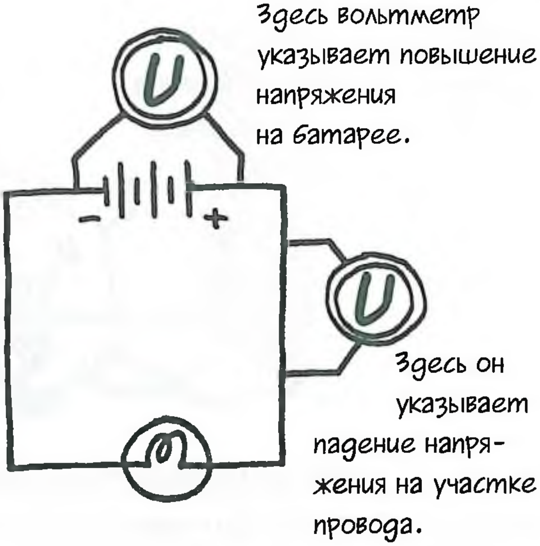
* Только если провод не слишком длинный и не слишком тонкий.

Всего за 10 долларов можно купить **МУЛЬТИМЕТР**, который укажет напряжение, силу тока и сопротивление.

Чтобы измерить напряжение, подключи мультиметр **ПАРАЛЛЕЛЬНО** лампе или батарее. При подключении параллельно лампе он укажет **ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ** на ней.

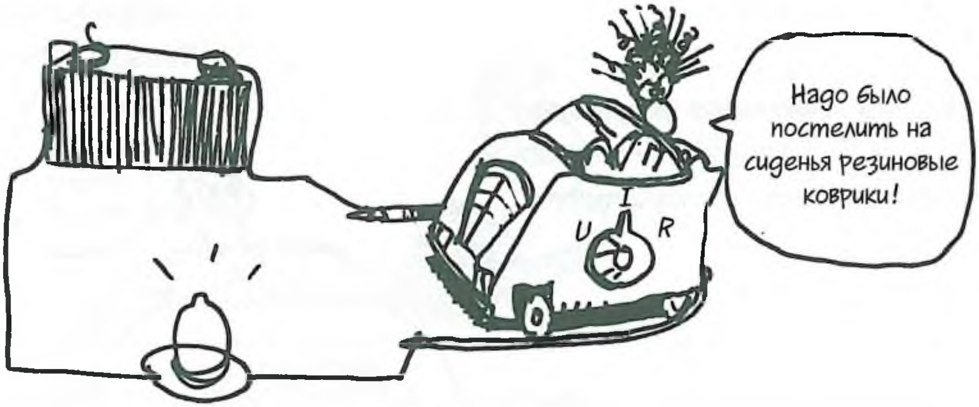
«Падение» напряжения указывает, сколько энергии на единицу заряда выделяется в виде света и тепла.

Если подключить мультиметр с одной стороны от лампы, он покажет почти нулевое значение, ведь для того, чтобы ток прошел по медному проводу, достаточно небольшого напряжения.
Если же подключить щупы мультиметра с разных сторон батареи, он укажет повышение напряжения — энергию, подаваемую в цепь батареей, в пересчете на единичный заряд.



Чтобы измерить **СИЛУ ТОКА**, нужно разомкнуть цепь и подключить в нее амперметр.

В нашей простой цепи сила тока везде одинакова. Чтобы измерить ее, нужно, чтобы ток пошел через амперметр.

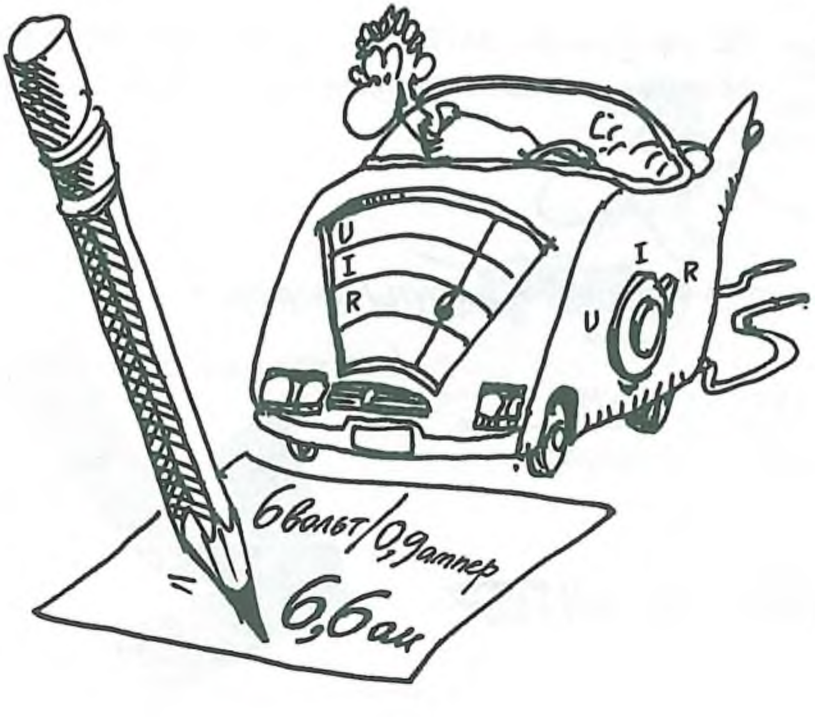


Измерить сопротивление нити накала лампы можно напрямую: выкрути лампу, переведи мультиметр в режим измерения сопротивления и подключи к лампе.

Или вычисли сопротивление по закону Ома, записав показания вольтметра и амперметра.

$$R = \frac{U}{I}$$

Эти два результата будут немного отличаться: когда лампа включена, нить накала нагрета до большой температуры (и ее сопротивление выше), а когда мы измеряем сопротивление лампы отдельно, нить накала холодная.



Еще одна единица измерения в электричестве — это

ВАТТ, единица МОЩНОСТИ.

Мощность определяется как **ЭНЕРГИЯ** в единицу времени. Она указывает, как быстро выделяется или потребляется энергия. Мощность имеет смысл и в механических системах: например, мощная машина быстро разгоняется. Мощная лампа излучает много света в секунду.

По определению, **ВАТТ** равен одному **ДЖОУЛЮ В СЕКУНДУ**, поэтому его можно выразить через вольты и амперы.

Мощность (в ваттах) = джоуль/секунда =

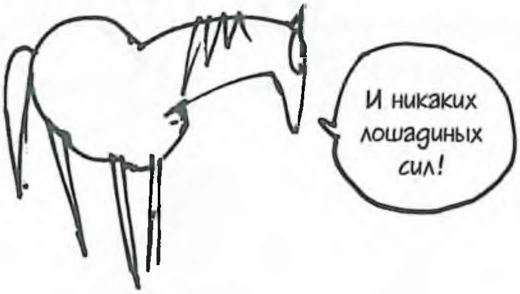
$$= \frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}} \times \frac{\text{кулон}}{\text{секунда}} =$$

= ВОЛЬТ × АМПЕР

Мощность равна произведению
НАПРЯЖЕНИЯ
на **СИЛУ ТОКА:**

$$P = UI$$

ватт = вольт × ампер



В нашем примере с лампой на 6 Ом, подключенной к 6-вольтовой батарее, сила тока равна 1 амперу, а мощность равна

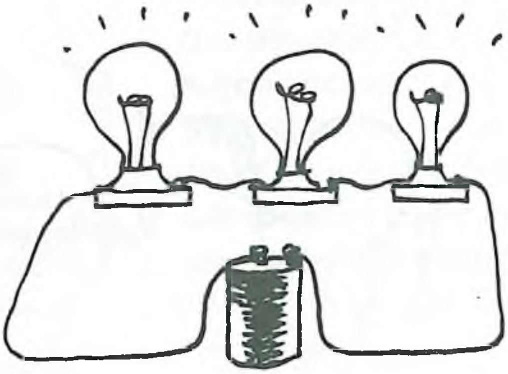
P = 6 вольт × 1 ампер =

= 6 ватт

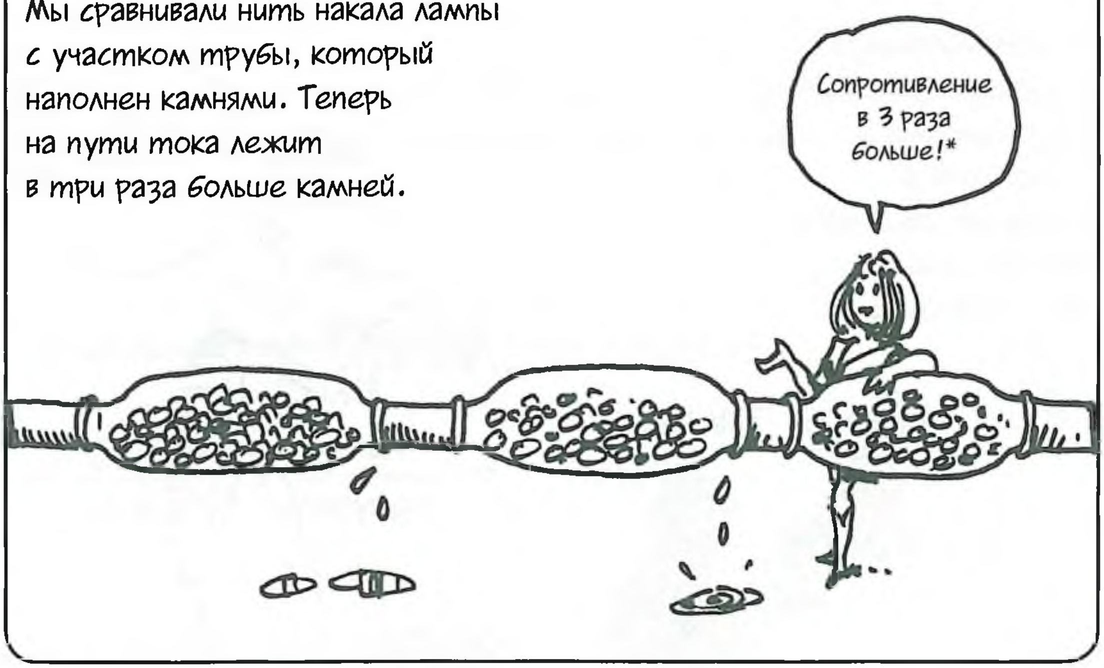
Глава 16

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Теперь подключим три одинаковые лампочки к батарее **ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО**, то есть одну за другой.



Мы сравнивали нить накала лампы с участком трубы, который наполнен камнями. Теперь на пути тока лежит в три раза больше камней.

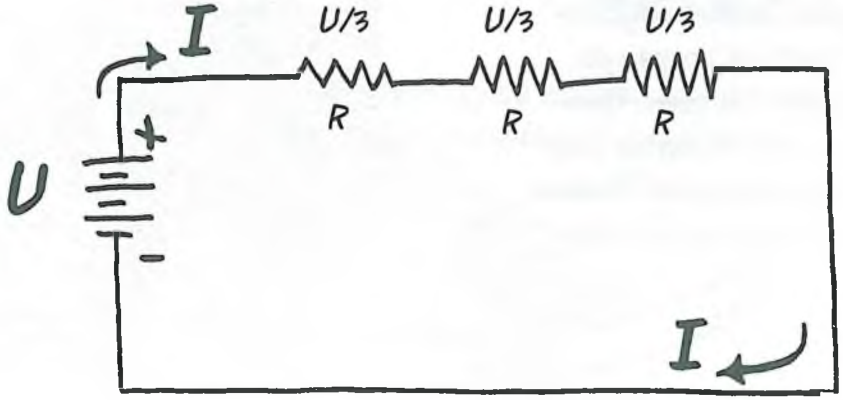


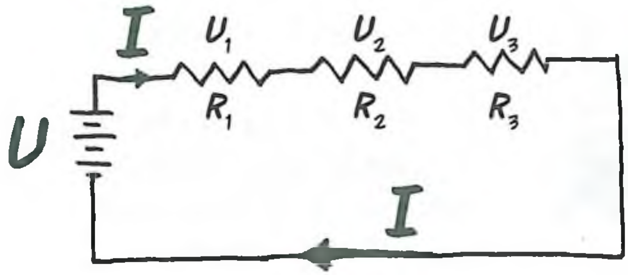
* Мы предполагаем, что сопротивление лампы не зависит от силы тока. На самом деле это не так, ведь от нее сильно зависит температура нити накала.

Сопротивление утроилось, значит, сила тока уменьшится в три раза. Разумеется, сила тока на каждой лампе должна быть одинаковой: зарядам больше некуда деваться, а накапливаться в цепи они не могут.

Подключив щупы мультиметра к лампам, мы увидим, что падение напряжения на каждой равно трети напряжения батареи.

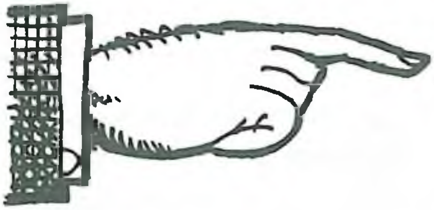
Лампы делят напряжение между собой, и суммарное **ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ** на них должно равняться напряжению батареи.





В более общем случае, когда сопротивление элементов отличается, падения напряжения U_1, U_2 и U_3 обозначают энергию, потребляемую лампами*, — энергию, преобразованную из электрической энергии в свет и тепло.

Общая энергия, потребляемая лампами, должна равняться энергии, которую выделяет батарея. Значит, сумма падений напряжения должна равняться напряжению батареи. Это правило называется первым правилом Кирхгофа:



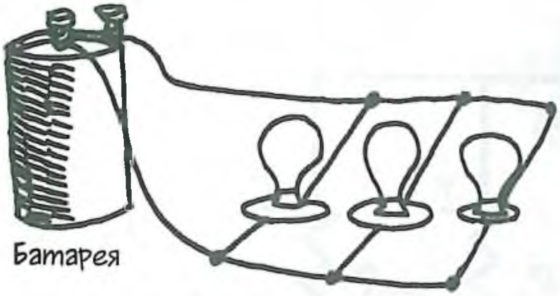
$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

(а $U_1 = IR_1$ и т.д.)

При последовательном соединении сила тока и напряжение на каждой из трех одинаковых ламп будут в три раза меньше, чем на одной лампе, подключенной к батарее напрямую. Так как мощность равна произведению напряжения на силу тока, каждая лампочка светит в девять раз слабее обычного!

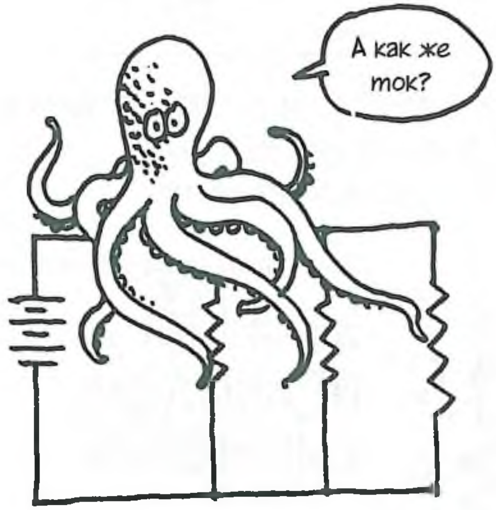
* Не забудь: напряжение — это энергия на единичный заряд.

Теперь подключим лампы **ПАРАЛЛЕЛЬНО**:



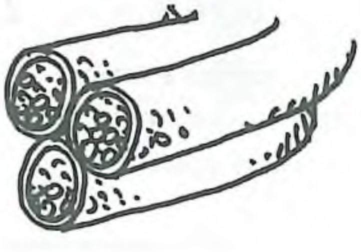
Каждая лампа подключена к батарее напрямую, других ламп между ней и батареей нет.

Так каждая лампочка получает полное напряжение и светит так же ярко, как обычно. Проводка в домах прокладывается именно так, чтобы обеспечить полное напряжение на всех электроприборах.

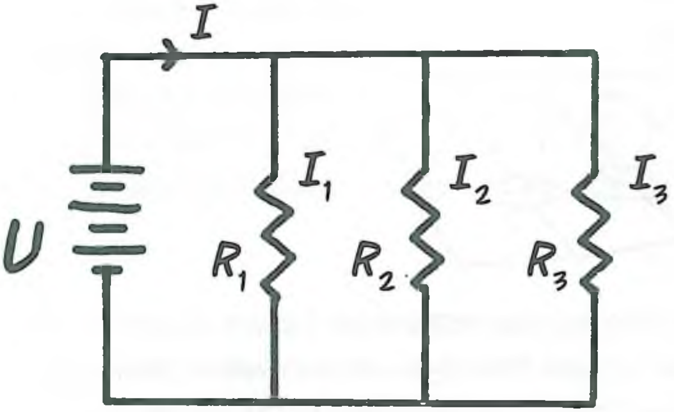


При параллельном соединении **ТОК** делится на три части и течет по трем участкам цепи.

Общее **СОПРОТИВЛЕНИЕ** цепи равно одной трети сопротивления одной лампы, ведь сечение нашей «трубы с камнями», по которой течет вода, утроилось. Следовательно, по закону Ома, через всю цепь в целом сможет пройти в три раза больше тока.



Подведем итог. При параллельном соединении напряжение на всех участках цепи одинаково, а сила тока I на каждом участке, по закону Ома $I = U/R$, обратно пропорциональна сопротивлению.



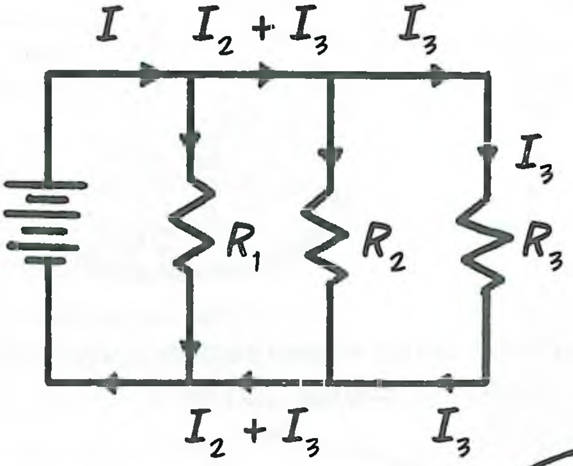
$$I_1 = \frac{U}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3}$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Чему равна сила тока на разных участках цепи? Сумма токов, входящих в любой узел цепи, должна быть равна сумме токов, выходящих из этого узла. Ток — это поток заряда, а заряд сохраняется.



Это правило называется

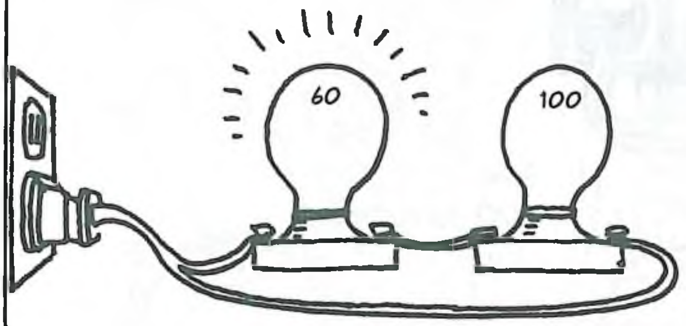
ВТОРЫМ ПРАВИЛОМ КИРХГОФА.

Сумма токов, входящих в любой узел цепи, равна сумме токов, выходящих из этого узла.

Вот один интересный

ПАРАДОКС:

Подключим 60-ваттную и 100-ваттную лампы последовательно.



60-ваттная лампа светит **ЯРЧЕ!** Почему?

Номинальная мощность достигается только тогда, когда лампы подключены по отдельности, а не последовательно.

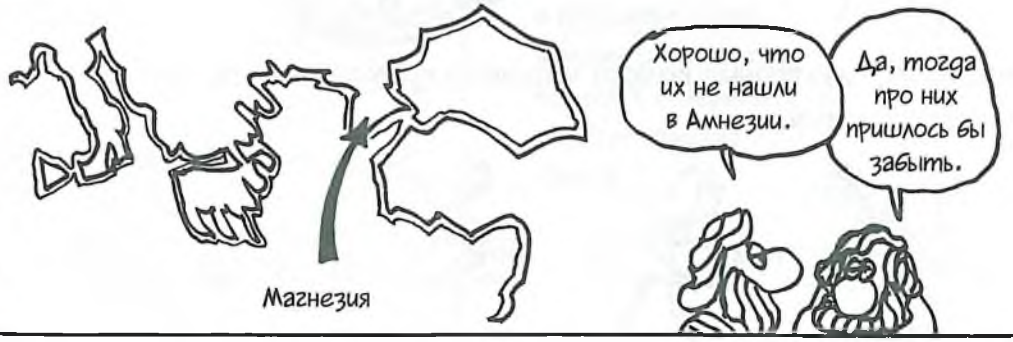
Чему равно напряжение на каждой лампе? Сила тока I одинакова, а падение напряжения на лампах можно найти по закону Ома

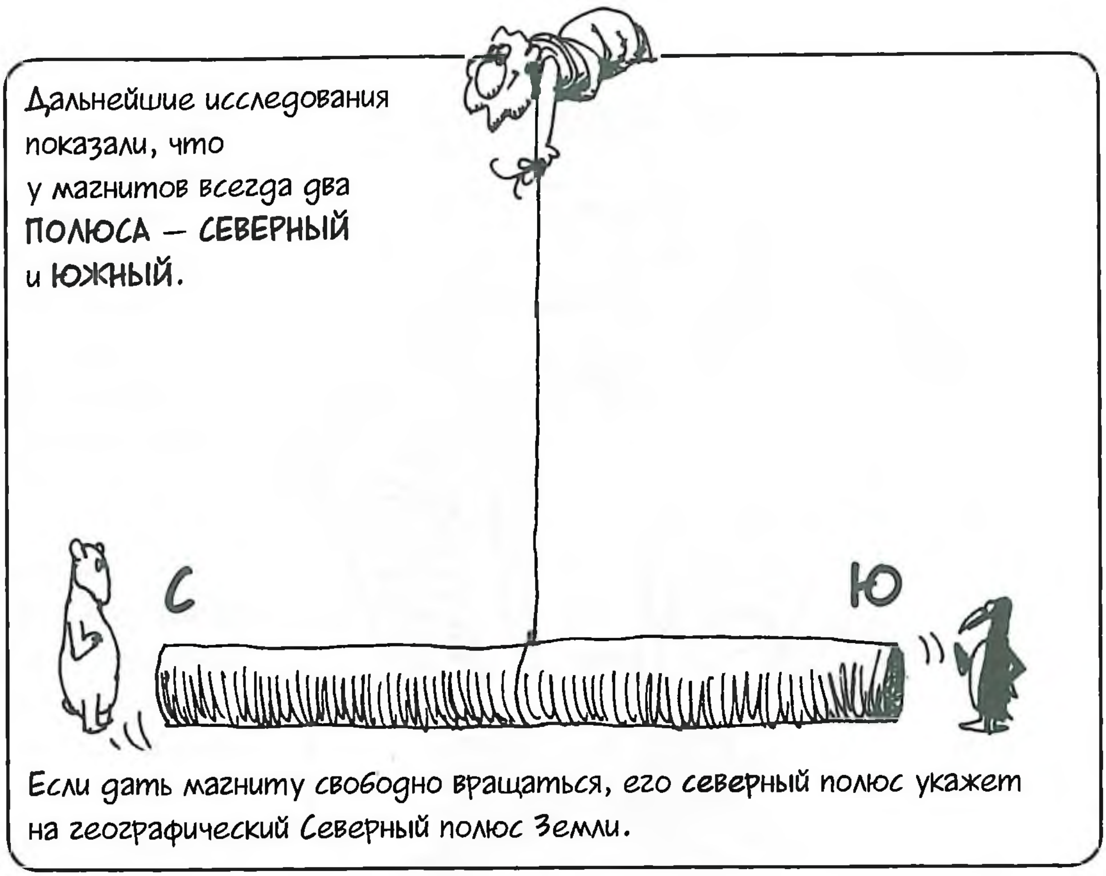
$$U = IR.$$

Сопротивление 60-ваттной лампы больше: когда она подключена отдельно, ток на ней меньше и она светит не так ярко.
60
Сопротивление 100-ваттной лампы меньше: когда она подключена отдельно, ток на ней больше.
Логично!
Но при ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ соединении на 60-ваттной лампе с большим сопротивлением НАПРЯЖЕНИЕ БОЛЬШЕ...
60
А на 100-ваттной лампе — меньше!
100
Получается, реальная мощность P = UI для 60-ваттной лампы будет выше, чем для 100-ваттной!
Понятно?
Да, теперь понятно... Никакого парадокса тут и НЕ БЫЛО...

ГЛАВА 17

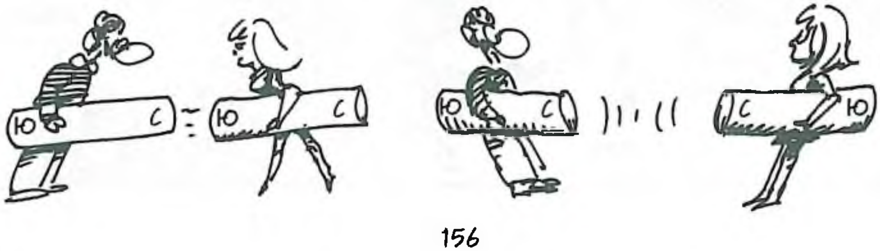
Несколько тысяч лет назад древние греки обнаружили, что некоторые минералы из области **МАГНЕЗИЯ** в Малой Азии притягивают железо, а еще притягиваются или отталкиваются друг от друга. Так появилось название «магниты».

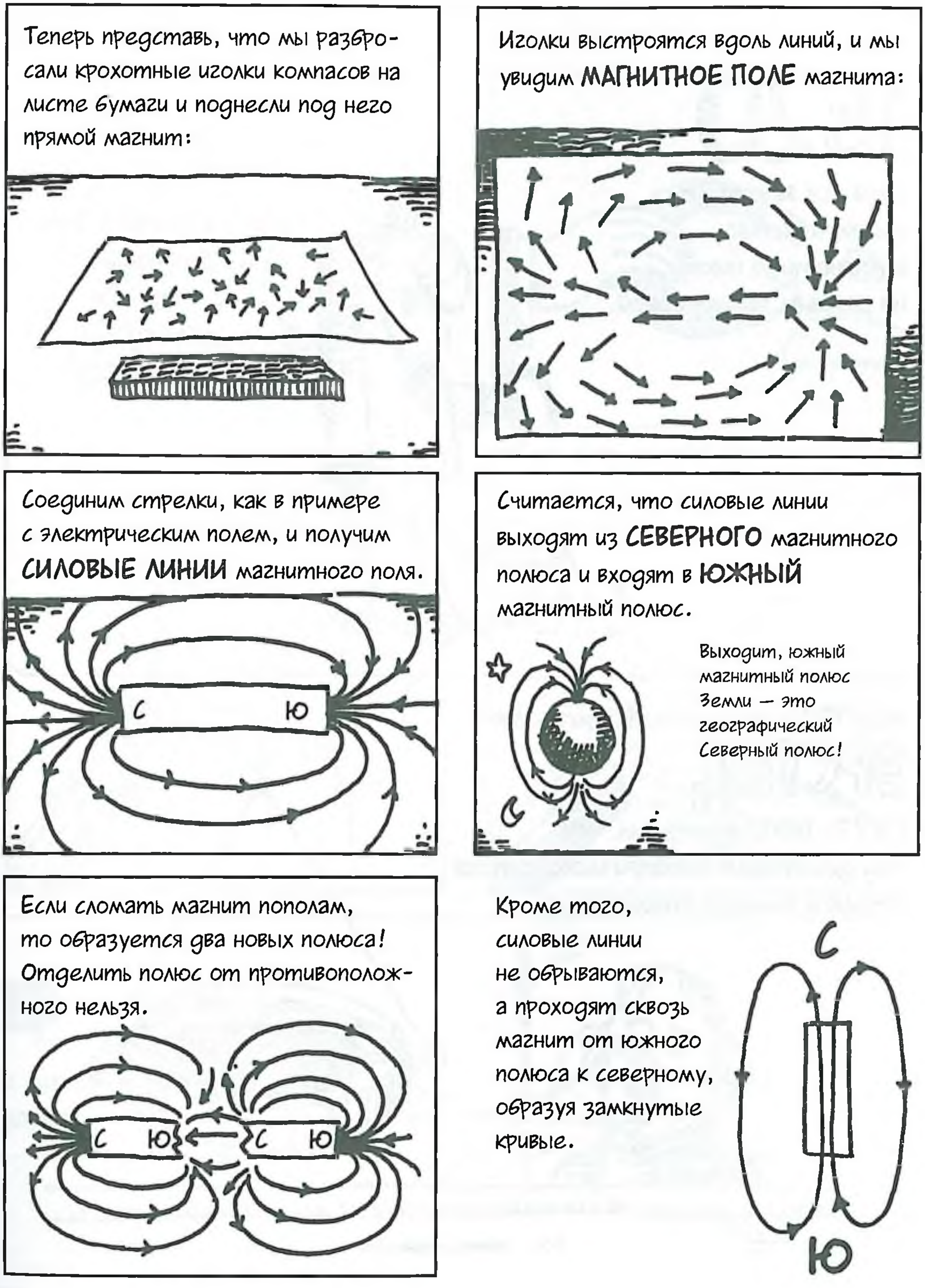




КОМПАС – это всего лишь магнитная стрелка, закрепленная на стержне.

Заметим, что разные полюса магнитов притягиваются, одинаковые – отталкиваются.




Теперь представь, что мы разбросали крохотные иголки компасов на листе бумаги и поднесли под него прямой магнит:
Иголки выстроятся вдоль линий, и мы увидим МАГНИТНОЕ ПОЛЕ магнита:
Соединим стрелки, как в примере с электрическим полем, и получим СИЛОВЫЕ ЛИНИИ магнитного поля.
С
Ю
Считается, что силовые линии выходят из СЕВЕРНОГО магнитного полюса и входят в ЮЖНЫЙ магнитный полюс.
Выходит, южный магнитный полюс Земли — это географический Северный полюс!
Если сломать магнит пополам, то образуется два новых полюса! Отделить полюс от противоположного нельзя.
С
Ю
С
Ю
Кроме того, силовые линии не обрываются, а проходят сквозь магнит от южного полюса к северному, образуя замкнутые кривые.
С
Ю

До

1820

года все верили, что электричество и магнетизм никак не связаны между собой.

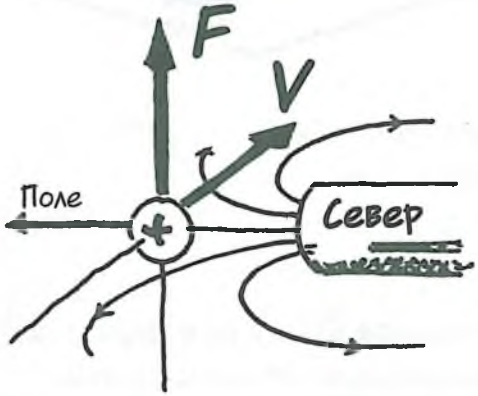
Но в 1820 году датский физик Ханс

ЭРСТЕД

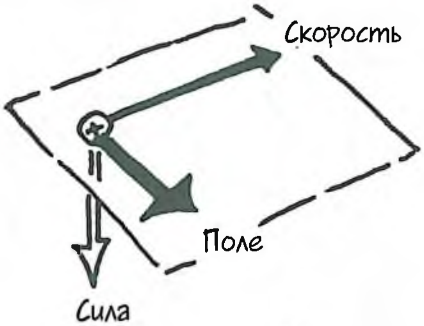
(1777–1851) обнаружил, что под действием электрического тока стрелка компаса отклоняется.

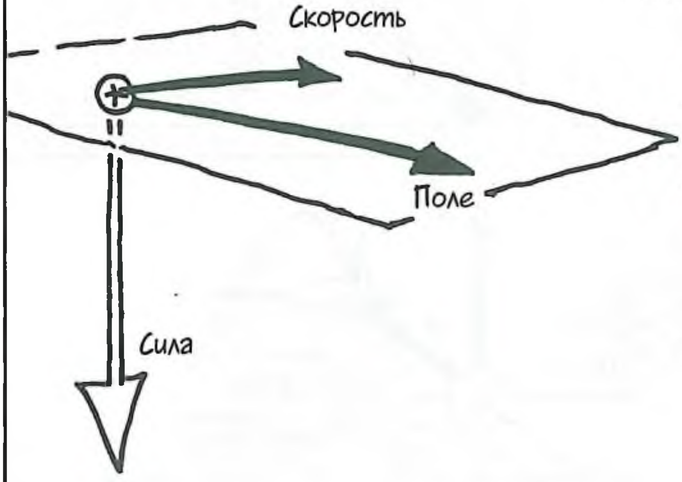
ВОПРОС: ЧТО ЧУВСТВУЕТ ЗАРЯД В МАГНИТНОМ ПОЛЕ?

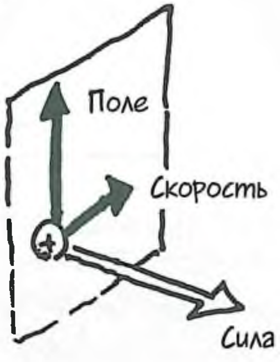
На заряд действует «боковая» сила — она перпендикулярна и силовой линии, и скорости заряда.



Величина силы пропорциональна напряженности поля и скорости движения частицы в нем. Именно эта «боковая», «трехмерная» сила больше всего усложняет электричество и магнетизм. Вот несколько примеров.

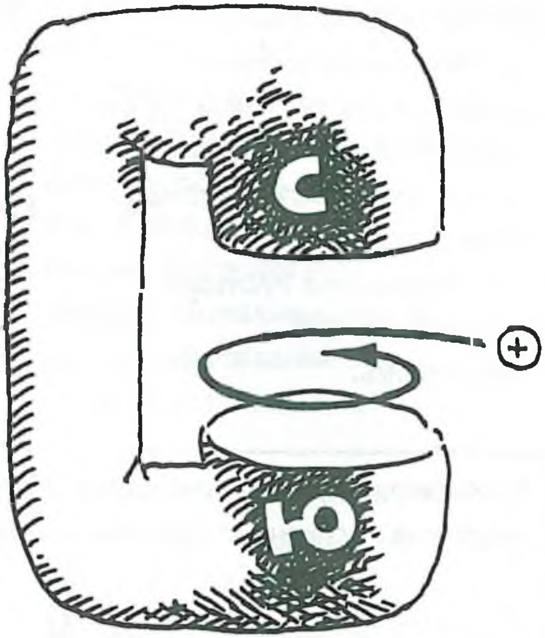




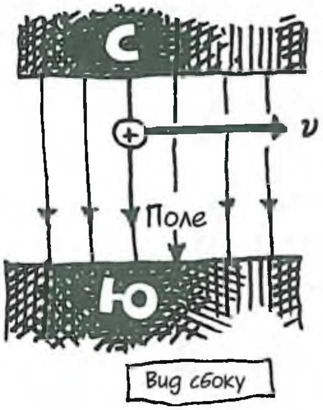


Внимание: силовая линия и направление скорости определяют плоскость. Сила перпендикулярна этой плоскости.

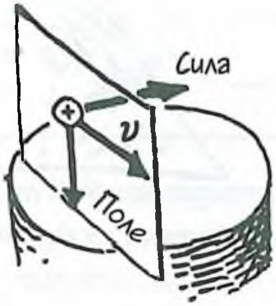
Вот магнитное поле,
в котором заряженные частицы бесконечно кружатся между двумя противоположными полюсами:



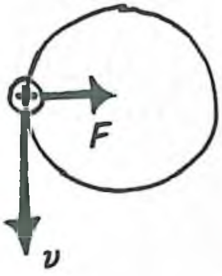
Магнитное поле между гранями магнита всегда перпендикулярно скорости частицы, поэтому



сила, перпендикулярная им обоим, указывает в центр круга!



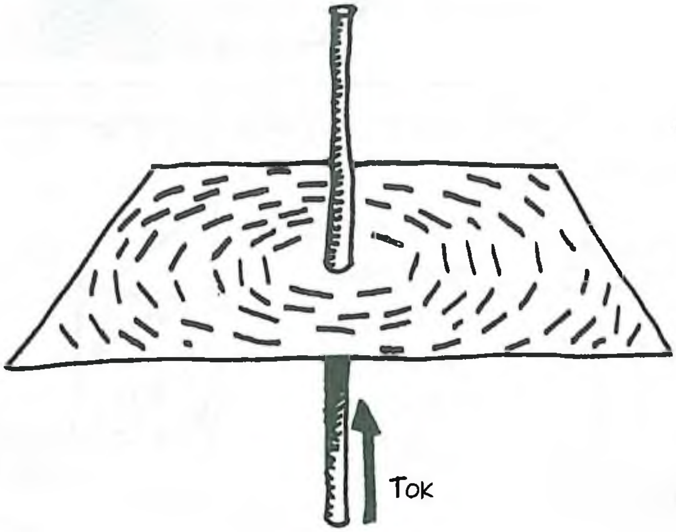
Это центростремительная сила, которая поддерживает круговое движение частицы! Вид сверху напоминает уже знакомый тебе рисунок:



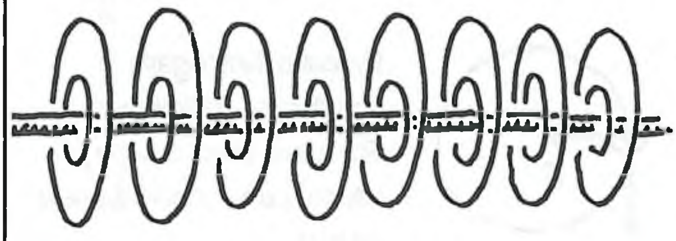
Именно благодаря этой силе работают большие ускорители частиц и накопительные кольца.

Магниты действуют на движущиеся частицы с силой, а при движении заряда тоже создается магнитное поле — это показал Эрстед. Именно поэтому в эксперименте Эрстеда стрелка компаса отклонялась.

Рассмотрим простейший случай. Проденем токонесущий провод через плоскость, усыпанную магнитными стрелками.



Стрелки выстроятся вокруг провода кругами.

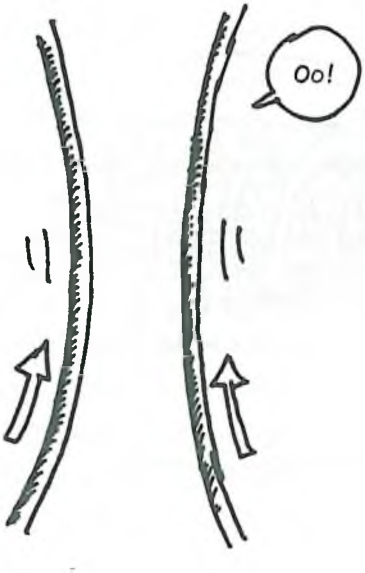


Магнитное поле тока образовано кругами, центры которых лежат на проводе. Эти круги расположены перпендикулярно направлению тока.

Чтобы определить направление линий магнитного поля, укажи большим пальцем правой руки в направлении потока положительных зарядов. Остальные пальцы укажут направление линий магнитного поля.

Это правило называется

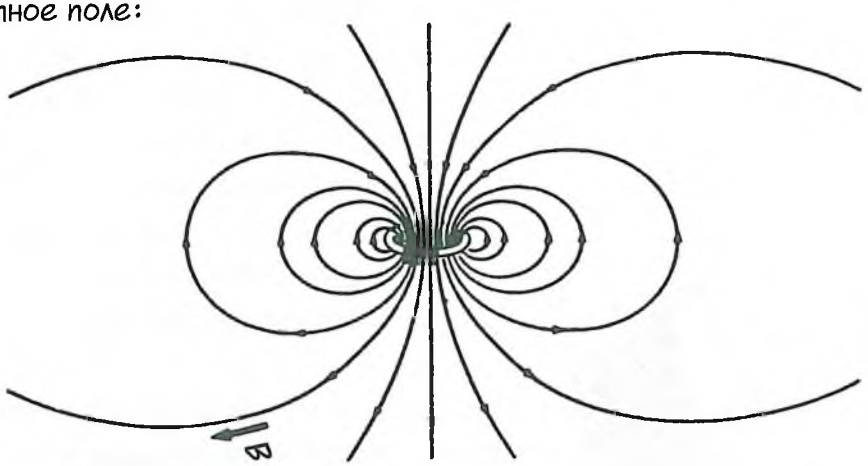
ПРАВИЛОМ ПРАВОЙ РУКИ.



Если направление токов совпадает, параллельные проводники притягиваются. Магнитное поле, окружающее проводник, действует на другой проводник с силой и притягивает его. Проверь, в каком направлении действует поле, по правилу правой руки!

Ампер, открывший взаимодействие между параллельными проводниками.

Если свернуть проводник с током в кольцо, получится вот такое магнитное поле:

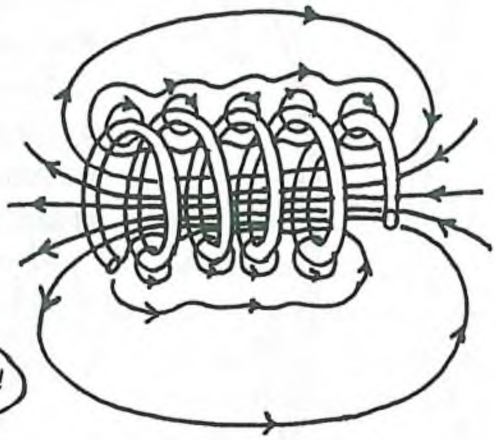


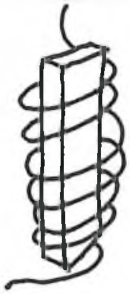
Обрати внимание, что одна сторона похожа на **СЕВЕРНЫЙ** полюс (силовые линии выходят из нее), другая сторона — на **ЮЖНЫЙ** полюс (силовые линии входят в нее).

Если свернуть проводник в несколько витков, магнитное поле усилится. Если намотать провод на цилиндр, получится

СОЛЕНОИД

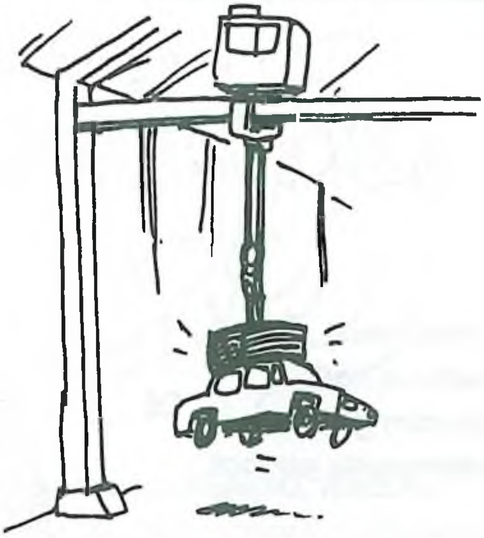
с магнитным полем, как у плоского магнита!





Если вставить
в соленоид стальную
пластину, магнитное
поле усилится,
и получится

ЭЛЕКТРО-МАГНИТ.



Во всех этих электрических
и магнитных полях легко
запутаться. Представь, что
твоя комната заполнена такими
полями. Как их обнаружить?
Как узнать, где какое поле?

Твоя комната **НА САМОМ ДЕЛЕ**
заполнена полями. Это и магнитное
поле Земли, и электрическое
и магнитное поля от радиоволн.
Электрические поля от радиоволн
можно уловить антенной,
так как они перемещают
заряды в ней. Магнитное поле
Земли можно обнаружить
при помощи компаса или
по действию «боковых»
сил на движущиеся заряды.

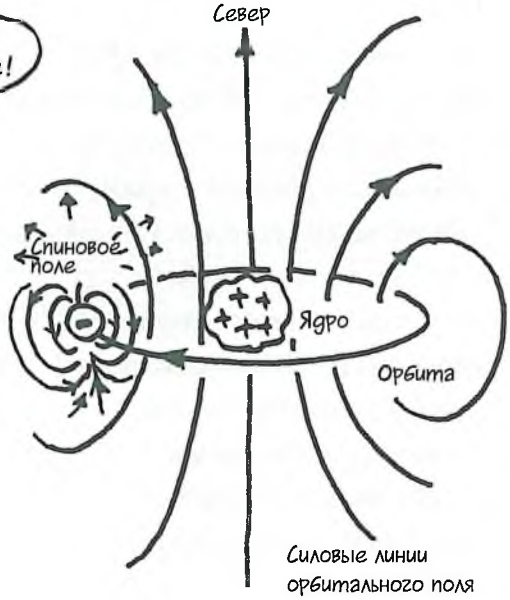
◊ ГЛАВА 18 ◊

ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ

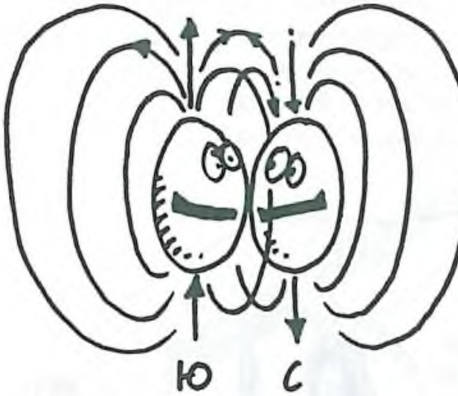
Все известные магнитные поля — результат движения электрических зарядов.

А какие заряды создают магнитное поле металлического магнита? Сами электроны в атомах железа!

Электрон, вращающийся вокруг ядра, подобен малому круговому току, поэтому создает **ОРБИТАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.** А еще электрон вращается вокруг своей оси и создает **СПИНОВОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.**



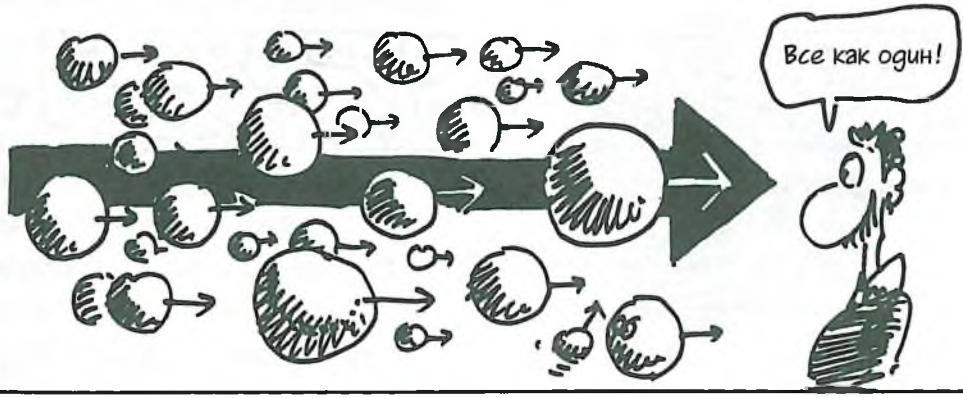
Магнитные поля большинства электронов в атомах компенсируются магнитными полями других электронов...

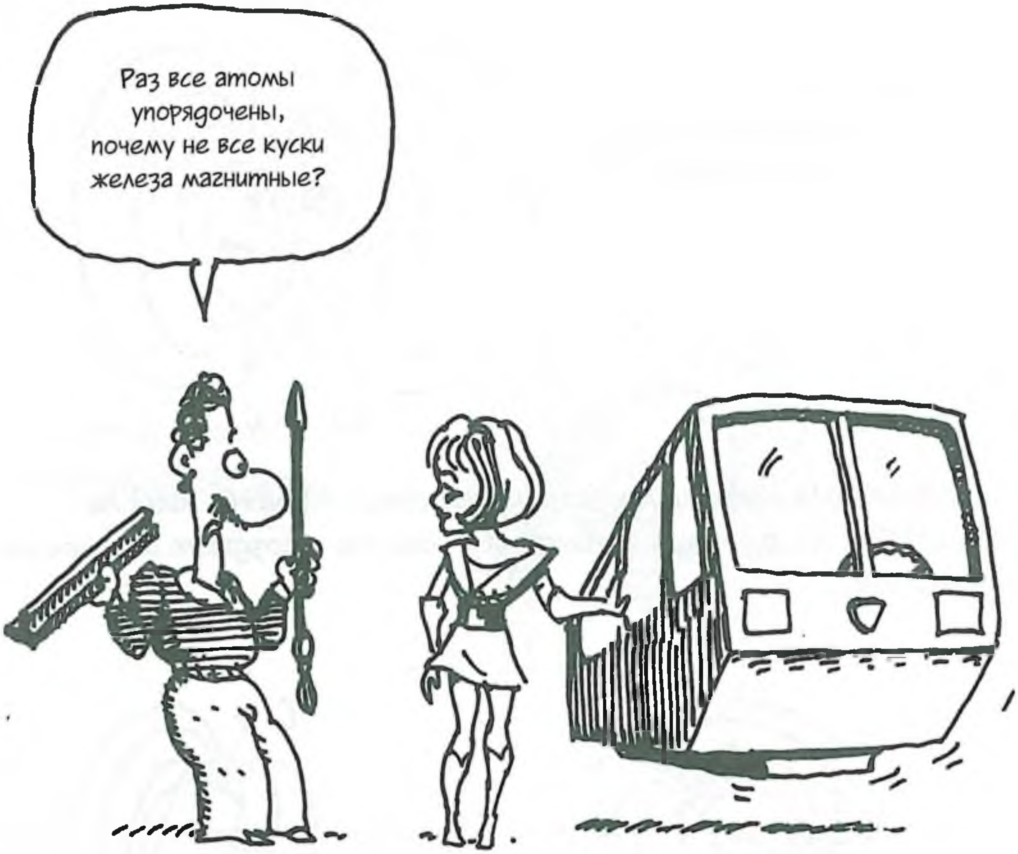


но в **МАГНИТНЫХ** материалах (к ним относятся **ЖЕЛЕЗО**, **НИКЕЛЬ** и **КОБАЛЬТ**) есть одинокие электроны — они-то и создают магнитные поля атомов...

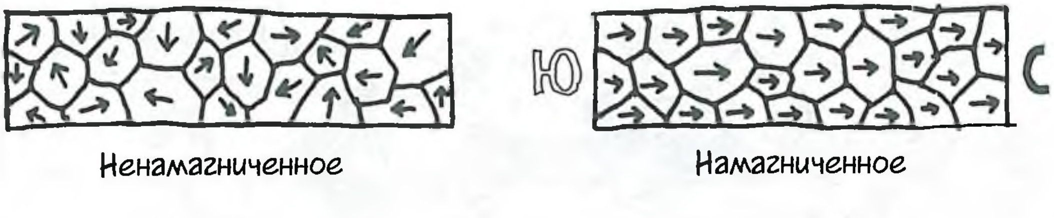
... более того,

в этих «ферромагнитных» элементах сами атомы выстраиваются так, что линии их магнитных полей указывают в одну сторону. Получается одно большое магнитное поле!





Все атомы в микроскопических областях, называемых **ДОМЕНАМИ**, действительно упорядочены, но в ненамагниченном железе домены ориентированы в разные стороны. Когда железо помещают в магнитное поле, домены ориентируются вдоль силовых линий, и железо намагничивается.



Ненамагниченное Намагниченное

Некоторые сплавы металлов сопротивляются намагничиванию. Их домены упорядочиваются только под действием сильного внешнего магнитного поля, зато потом долго сохраняют ориентацию.

К таким сплавам относится сплав алюминия, никеля, кобальта, железа и меди под названием

АЛНИКО 5.

Чистое железо, наоборот, легко намагничивается, но и легко размагничивается, когда внешнее магнитное поле исчезает.

Ферромагнетизм проявляется только при температуре ниже пороговой — для железа это 770 °С. При нагреве магнитное поле исчезает.

Предполагают, что магнетизм Земли вызван циркуляцией электрических полей в земном ядре, но точное объяснение до сих пор не найдено. Мы до сих пор не можем объяснить первые известные проявления магнетизма — удивительно, не правда ли?

• ГЛАВА 19 •

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ

После открытия Эрстеда ученые двенадцать лет пытались обнаружить обратное явление и получить электрический ток из магнитного поля. Наконец в 1832 году Майкл Фарадей предложил:

Вот Ринго просовывает магнит через петлю из провода, подключенную к гальванометру — чувствительному прибору для измерения токов.
Стрелка гальванометра отклоняется!

Если магнит неподвижен, то прибор не фиксирует ток.

Еще один способ получить ток — поместить рядом с первой петлей еще одну и запитать ее от батареи. Стоит только включить или выключить ток во второй петле, и в первой петле возникнет ток!

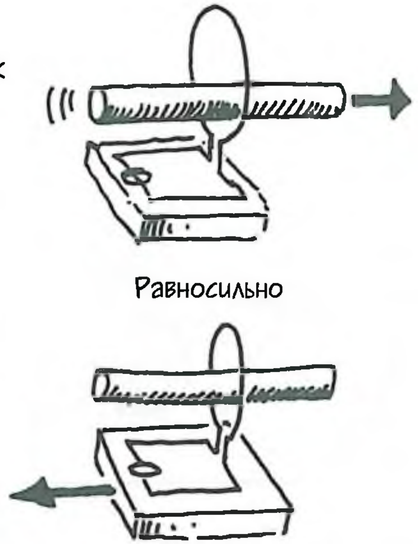
Но если ток во второй петле не меняется, то в первой петле тока не будет.

Энергия незаметно для нас преодолевает пространство — разве это не чудо?

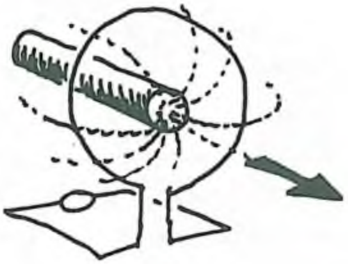
Фарадей описал это явление так: когда силовые линии магнитного поля пересекают проводник, в нем возникает

ЭЛЕКТРО-ДВИЖУЩАЯ СИЛА.

Не важно, что именно движется — само магнитное поле или проводник относительно магнита.



Когда магнит проходит через петлю, его силовые линии пересекают проводник и возникает **ЭДС**, которая порождает ток.

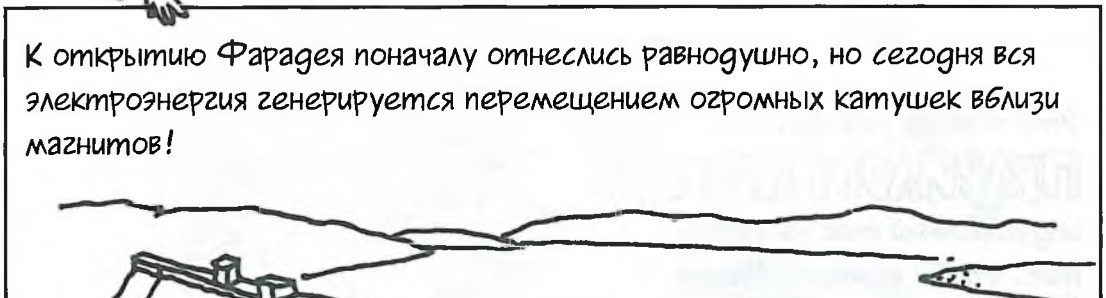


То же самое происходит, когда петля движется рядом с магнитом.

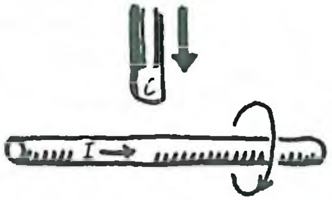
Когда мы включаем ток в первой петле, во второй петле нарастает магнитное поле, его силовые линии рассекают первую петлю и возникает **ЭДС**.

При выключении тока силовые линии постепенно исчезают и снова пересекают петлю.

Результат занимательный, но едва ли полезный...
О да. Займемся же тем, что в самом деле важно, — рассмотрим, как форма черепа определяет криминальные наклонности.
Френология


К открытию Фарадея поначалу отнеслись равнодушно, но сегодня вся электроэнергия генерируется перемещением огромных катушек вблизи магнитов!
Удивительно, что по такому же принципу устроены и огромные гидроэлектростанции, турбины которых дают достаточно электроэнергии для целых городов на расстоянии в сотни километров!

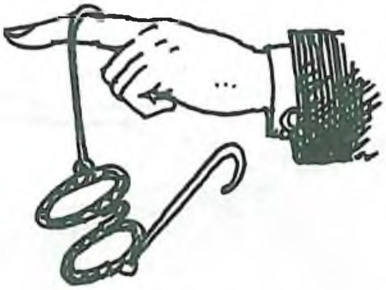
Рассмотрим эксперимент Фарадея подробнее. Откуда берется **ЭНЕРГИЯ**, необходимая для движения стрелки гальванометра, когда мы двигаем магнит возле петли из провода и получаем ток?



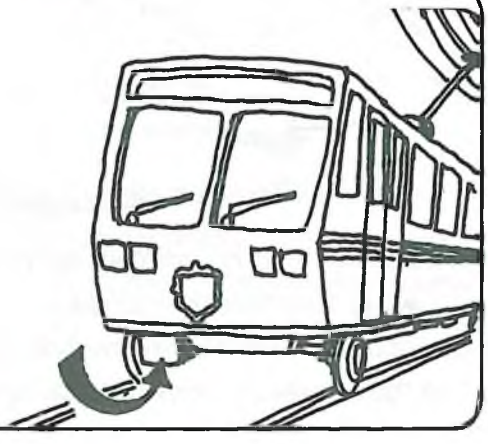
Когда индукционный ток движется по проводу, возникает магнитное поле. Это магнитное поле должно сопротивляться движению магнита, поэтому при его движении совершается работа.

Когда Ринго вводит северный полюс магнита в петлю, ток должен течь так, чтобы северный полюс магнитного поля отталкивал магнит.

Это правило называется **ПРАВИЛОМ ЛЕНЦА:** индукционный ток направлен так, чтобы компенсировать изменение, которым он вызван.



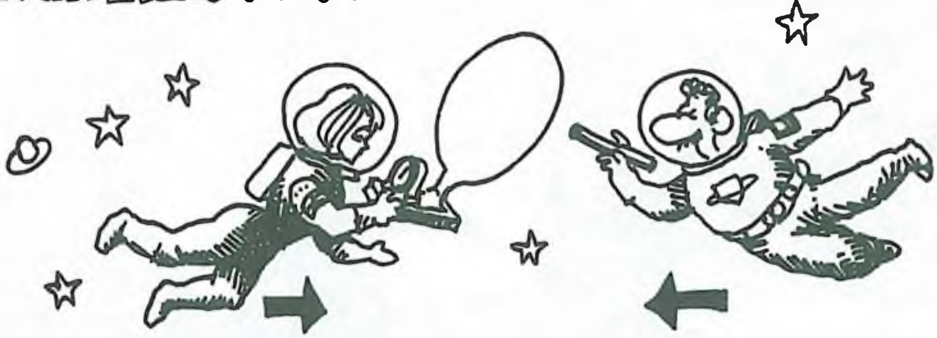
Правило Ленца — следствие закона сохранения энергии. Оно применяется в **МАГНИТОРЕЛЬСОВЫХ ТОРМОЗАХ** трамваев: возле рельса помещается электромагнит, ток в электромагните порождает противоположный ток в рельсе, и трамвай тормозит.



ГЛАВА 20
ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

Рассмотрим эксперимент Фарадея еще раз. Я держу петлю, Ринго держит магнит. Когда я иду вперед, стрелка гальванометра отклоняется.
Все понятно: провод содержит заряды, при движении зарядов на них действует боковая магнитная сила, которая толкает их вдоль петли.
Поле
Линии магнитного поля
v
Сила
Петля
Движение
Что произойдет, если Ринго движется, а я стою?
Ммм... эээ... ну...
Мы знаем, что возникнет ток, но почему? Заряды изначально не двигаются, как же магнит воздействует на них?
Заряды могут перемещаться только под действием магнитного и электрического поля. Значит, где-то тут есть электрическое поле?
БРАВО!
Именно так Эйнштейн пришел к своей теории. Он заметил: в зависимости от того, кто из нас движется, ток вызывается либо магнитным, либо электрическим полем.
Изменение магнитного поля порождает электрическое поле!

Вернемся к эксперименту Фарадея (да-да, опять!), но на этот раз проведем его в **ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ**, чтобы нельзя было определить, кто из нас движется на самом деле. Мы знаем только то, что движемся **ОТНОСИТЕЛЬНО** друг друга.



Я думаю, что я стою на месте, а Ринго движется. Я фиксирую магнитное поле, но оно не может перемещать заряды, значит, должно быть и электрическое поле, вызванное изменением магнитного поля.

МЫ С РИНГО ВИДИМ РАЗНЫЕ ПОЛЯ!

Ринго думает, что он стоит на месте, а я двигаюсь. Он фиксирует только магнитное поле и перемещение зарядов, то есть порожденный электрический ток.

Физики обозначают магнитное поле буквой B.

В этом и заключается главная особенность теории относительности: для двух наблюдателей, которые движутся относительно друг друга, как мы с Ринго, основные физические величины Вселенной отличаются!

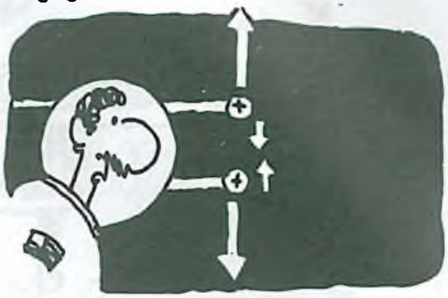
Вот пример попроще. Мимо Ринго пролетает одиночный заряд:

Ринго видит движущийся заряд — ток, порождающий магнитное поле. Стрелка компаса Ринго отклонится!

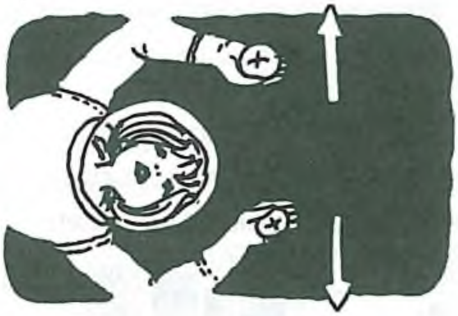
Но, если я двигаюсь вместе с зарядом, для меня он неподвижен. Магнитного поля нет, и стрелка моего компаса не шевелится!

Вот окончательное доказательство. Смотри внимательно! Я проношу мимо Ринго **ДВА** заряда.

Они отталкиваются, но для Ринго это два параллельных тока, которые притягиваются под действием магнитного поля!



Но для меня заряды неподвижны, поэтому я вижу, как они отталкиваются.

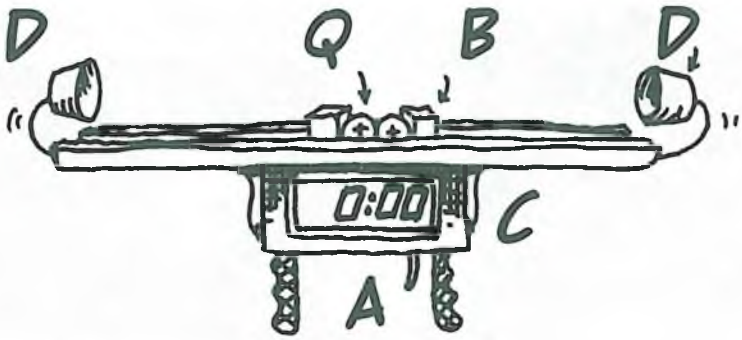


Я отпускаю заряды, и они разлетаются в стороны.

Теперь самое интересное: для Ринго заряды притягиваются под действием магнитной силы, которая частично компенсирует электрическую силу отталкивания. Для Ринго заряды будут разлетаться медленнее, чем для меня!

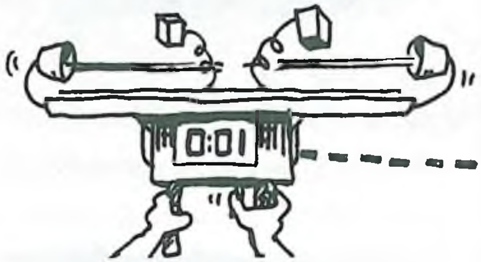
Понятно? Для Ринго, который движется относительно меня, скорость зарядов будет **МЕНЬШЕ**!

На рисунке изображено устройство, которое помогает измерить скорость зарядов.



По нажатию на крючок A снимаются ограничители B, запускается таймер C, и заряды Q разлетаются в стороны. Когда они ударяются о чашки D, таймер C останавливается.

Если я держу устройство неподвижно впереди себя, заряды разлетятся быстро — допустим, за 0,01 секунды.



Но мы только что показали, что Ринго фиксирует магнитные силы притяжения, которые замедляют движение зарядов.

Для Ринго заряды разлетятся **МЕДЛЕННЕЕ** — допустим, за 0,02 секунды! А еще он заметит, что за 0,02 секунды по его часам мои часы отсчитают всего 0,01 секунды. Вывод?

Что же подумает Ринго? Когда я пролетаю мимо него, он видит, что мои часы отсчитали 0,01 секунды, а его часы — в два раза больше. Он может сделать только один вывод:

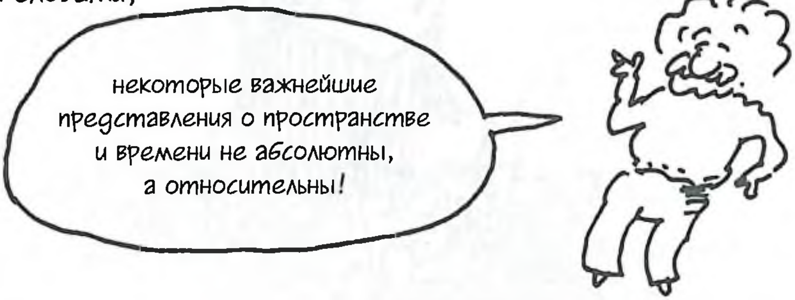
ИЗ-ЗА БЫСТРОГО ДВИЖЕНИЯ МОЁ ВРЕМЯ ЗАМЕДЛИЛОСЬ!

Это лишь один из множества необычных выводов теории относительности.

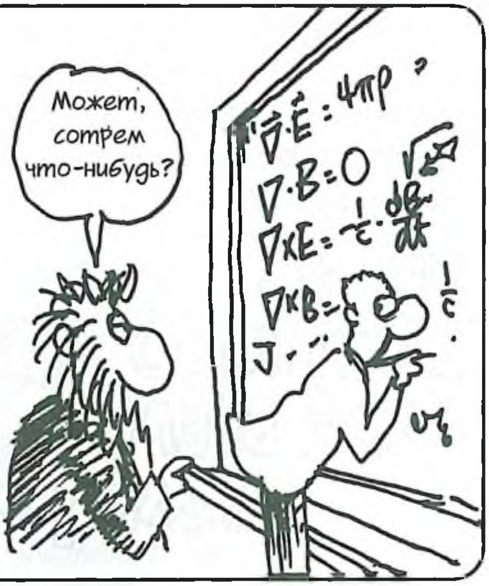
Согласно Эйнштейну, неподвижный наблюдатель, который следит за быстро движущимися предметами, заметит вот что:

* **ВРЕМЯ ЗАМЕДЛЯЕТСЯ**
* **ДЛИНА УМЕНЬШАЕТСЯ** (в направлении движения)
* **МАССА УВЕЛИЧИВАЕТСЯ**

Другими словами,



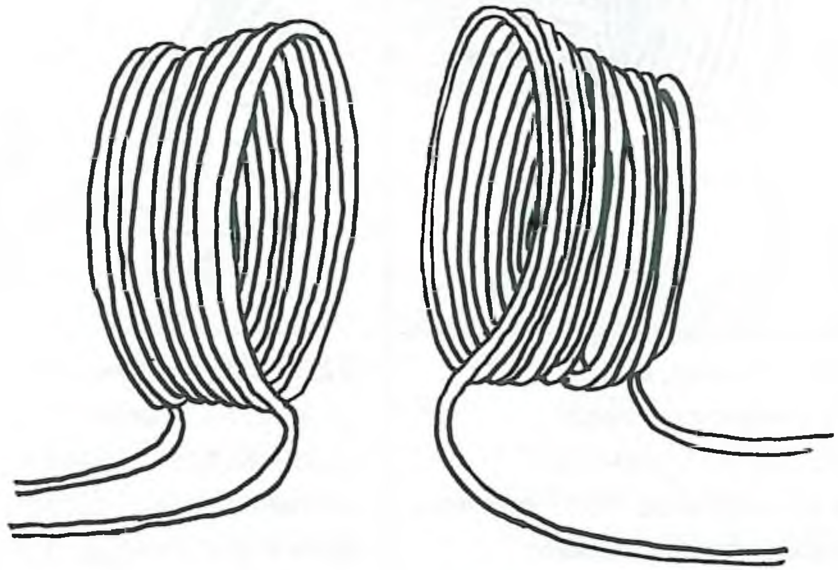
Мы увидели, что замедление времени объясняется простыми, наблюдаемыми явлениями из электричества и магнетизма. Физики конца XIX века знали, что их уравнения электромагнетизма не согласуются с механикой Ньютона. Большинство считало, что уравнения нужно как-то изменить...



...но только Эйнштейн увидел, что нужно переопределить сами понятия пространства и времени...

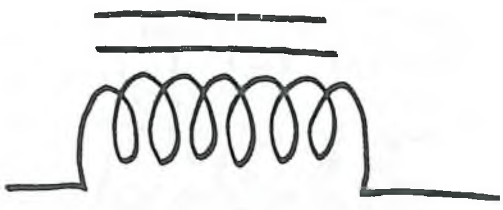
• ГЛАВА 21 •

КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ



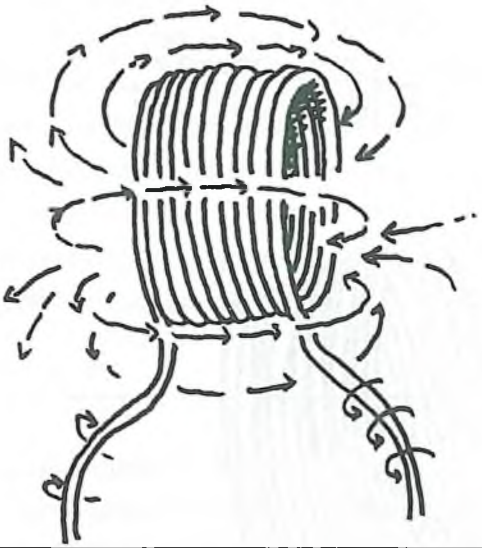
Катушка индуктивности — это всего лишь несколько витков провода. Иногда провод наматывают на железный сердечник, чтобы усилить магнитное поле. Катушки индуктивности обозначаются так:

Катушка индуктивности L



Катушка индуктивности L
с железным сердечником

Как ты уже знаешь, если по катушке течет ток, то вокруг нее образуется магнитное поле.



Если ток меняется, силовые линии магнитного поля пересекут витки катушки и возникнет

САМОИНДУКЦИЯ.

По правилу Ленца, возникающая ЭДС противодействует вызвавшему ее изменению. Когда ты включишь ток в катушке, ЭДС самоиндукции окажет сопротивление, и ток будет нарастать медленно. Когда ты выключишь ток, он на какое-то время сохранится под действием ЭДС самоиндукции.

ЭДС в катушке может достигать нескольких тысяч вольт. Когда ты щелкаешь выключателем, ЭДС может пробить искру по воздуху и ток в цепи на какое-то время сохранится.

Этот эффект используется в системе зажигания автомобиля.

Катушка имеет две обмотки — первичную, примерно из ста витков провода среднего размера, и вторичную, из нескольких тысяч витков тонкого провода. Первичная обмотка заряжается через контакты* 12-вольтовой батареи. Когда контакты размыкаются, ток в первичной обмотке пропадает, магнитное поле «сжимается» и порождает ток во вторичной обмотке. В ней очень много витков, поэтому порожденная ЭДС возрастает и вызывает кратковременный скачок напряжения до 50000 вольт!

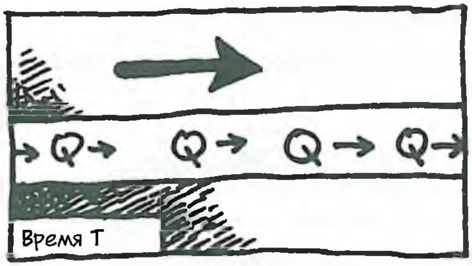
Прерыватель направляет этот ток на свечи зажигания, где возникает искра, которая воспламеняет бензин. Вот так из 12-вольтовой батареи получается высоковольтная искра.

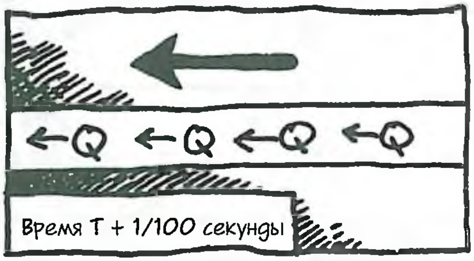
* В современных системах зажигания используется электронный переключатель.

Глава 22
Постоянный и переменный ток

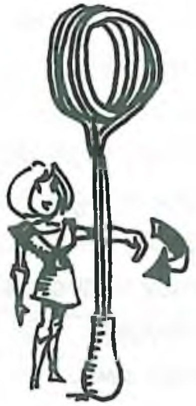
Пока что мы рассматривали только **ПОСТОЯННЫЙ ТОК** — поток зарядов, движущихся по проводу в одном направлении.

Однако мы обычно используем **ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК** — поток зарядов, который постоянно меняет направление. Переменный ток в розетке у тебя дома меняет направление 100 раз в секунду!

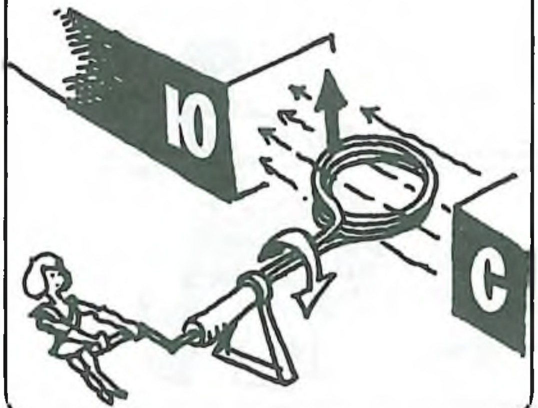




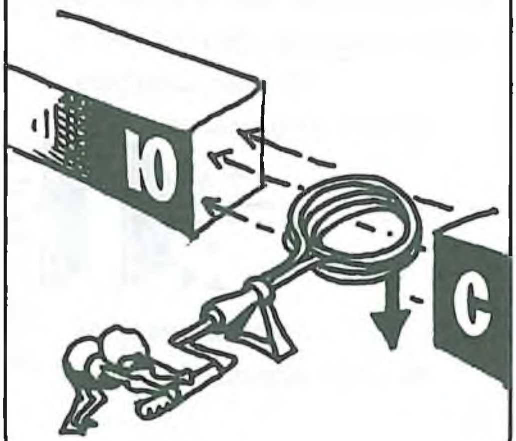
Я могу создать переменный ток, вращая эту катушку индуктивности в форме взбивалки в постоянном магнитном поле. Она будет пересекать силовые линии магнитного поля, и в ней возникнет ток.



Ток будет переменным, потому что петля пересечет силовые линии сначала в одном направлении...



а через пол-оборота — в другом.

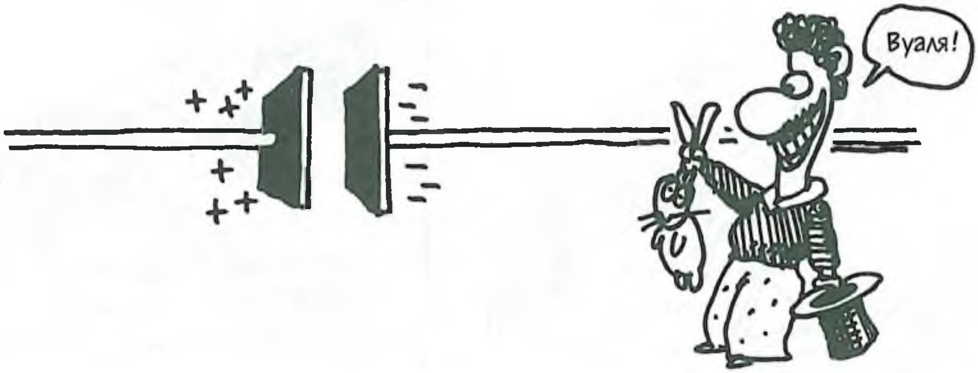


Полученный таким образом переменный ток можно снять «щетками» токосъемных колец. Именно так генерируется большая часть электроэнергии.

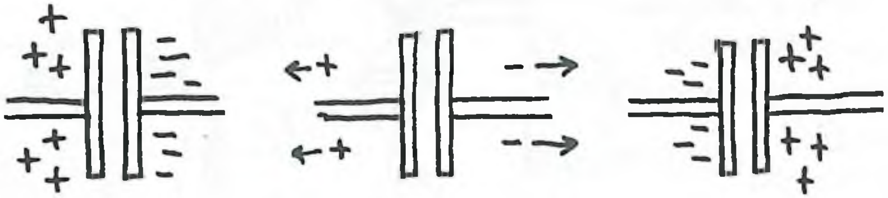
Конденсаторы и катушки индуктивности работают с постоянным и переменным током по-разному. ЭДС, возникающая в катушке, противодействует изменениям тока в ней. Так как переменный ток непрерывно меняется, катушка сопротивляется ему.

А постоянный ток спокойно течет по катушке.

Постоянный ток не проходит через конденсатор, ведь его пластины не соприкасаются. А вот переменный ток запросто «проскакивает» через конденсатор!

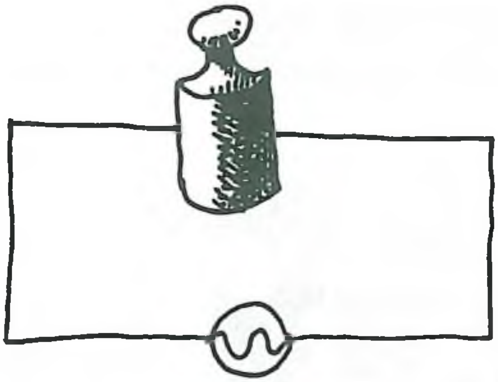


Заряд перемещается по цепи из стороны в сторону, и пластина конденсатора сначала заряжается, затем разряжается, а потом приобретает противоположный заряд. Кажется, что ток «перескакивает» через конденсатор.

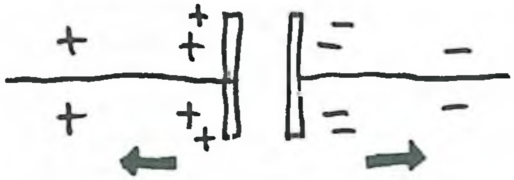


1. 2. 3.

Сопротивление катушки переменному току похоже на инерцию, а сама катушка — на массивный груз.



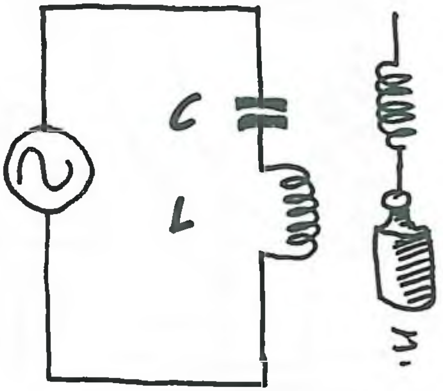
Если катушка индуктивности — это груз, то конденсатор — это пружина. Если подать заряд на уже заряженную пластину, она оттолкнет его, точно как пружина.



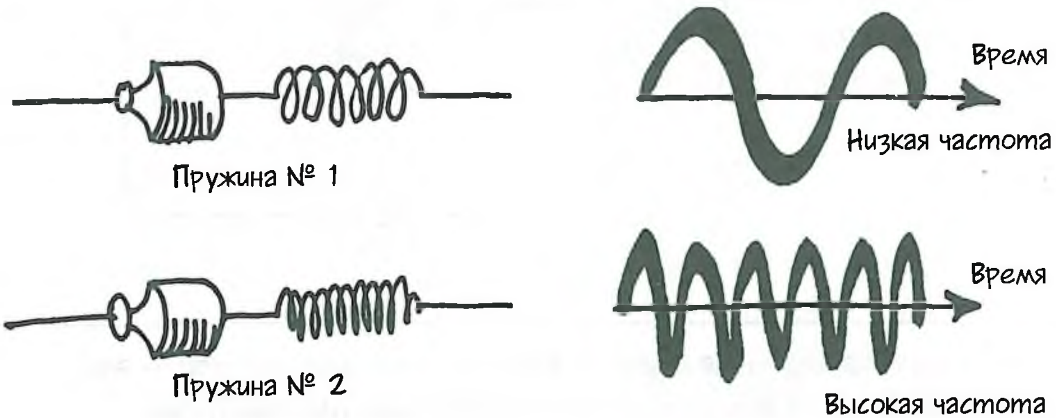
Конденсатор сопротивляется дополнительному заряду.

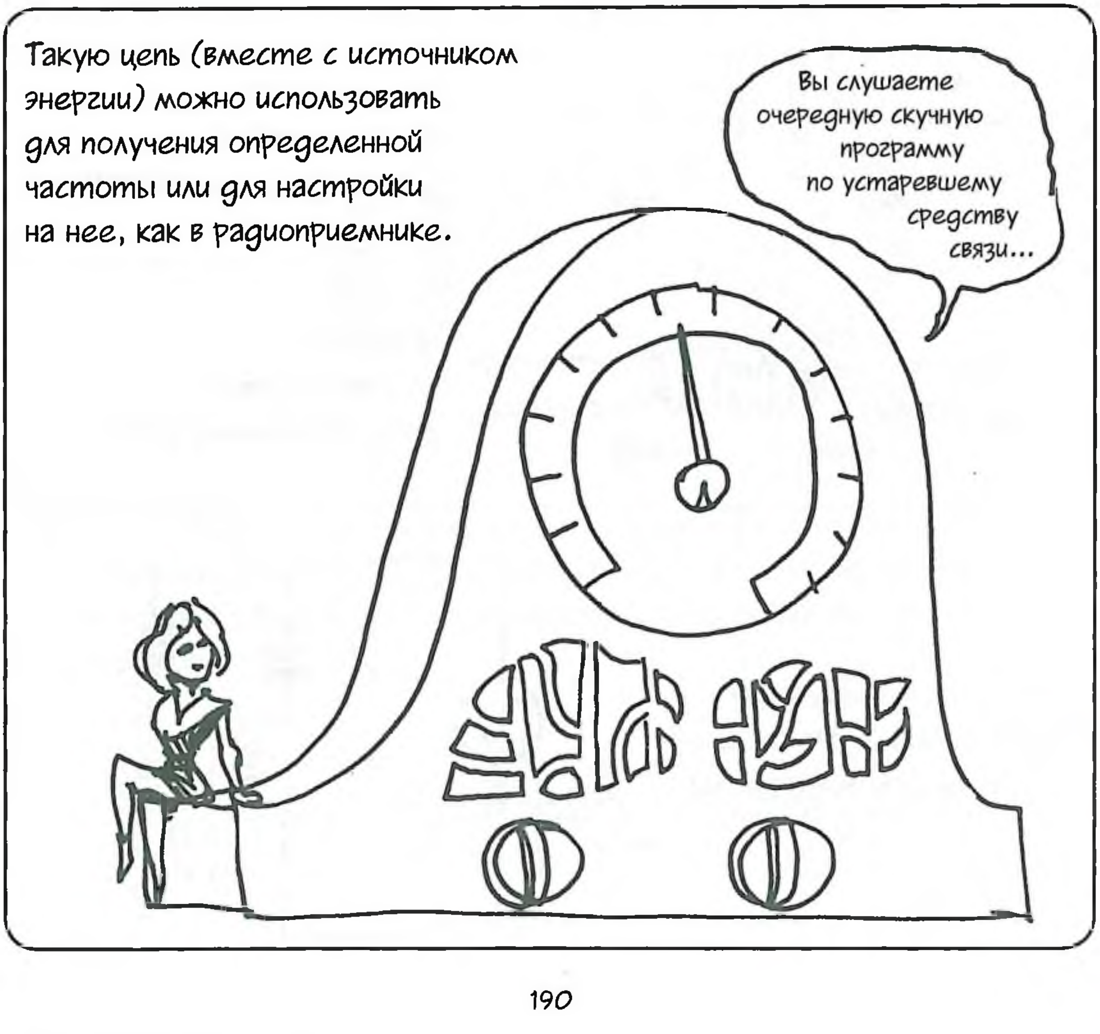
Пружина сопротивляется дополнительному усилию.

Катушка и конденсатор в цепи переменного тока — точно как груз на пружине!

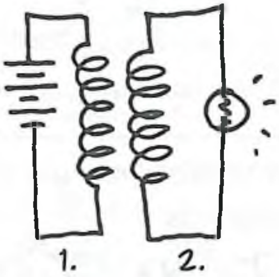


Такие цепи, как и груз на пружине, стремятся к определенной (резонансной) частоте колебаний.

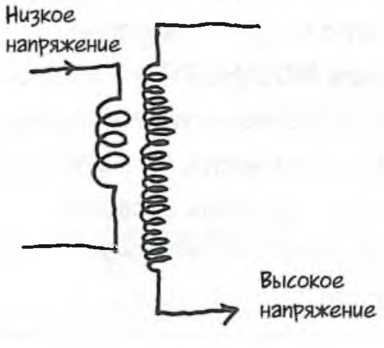


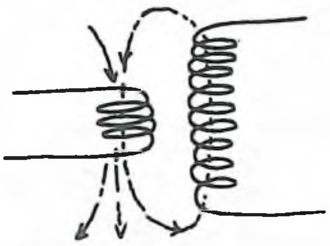


Помнишь две катушки индуктивности из опыта Фарадея (или из стартера машины)? Ток возникает в катушке № 2 только при включении или выключении тока в катушке № 1. Индуцированный ток возникает только под действием меняющегося тока.

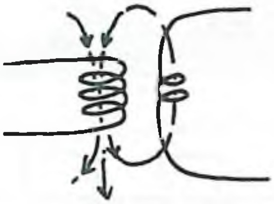


Лучше всего то, что индуцированное напряжение пропорционально **СООТНОШЕНИЮ ВИТКОВ**: чем больше витков в катушке № 2 по сравнению с катушкой № 1, тем выше индуцированное напряжение в катушке № 2!





Увеличение напряжения



Уменьшение напряжения

Нетрудно видеть, почему это так: чем больше витков вторичной обмотки пересекают силовые линии меняющегося магнитного поля, тем больше ЭДС индукции.

Если

N_p = число витков первичной обмотки

N_s = число витков вторичной обмотки,

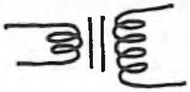
то

$$U_{вых} = \frac{N_s}{N_p} U_{вх}$$

Это устройство для преобразования напряжения называется

ТРАНСФОРМАТОРОМ

Оно обозначается



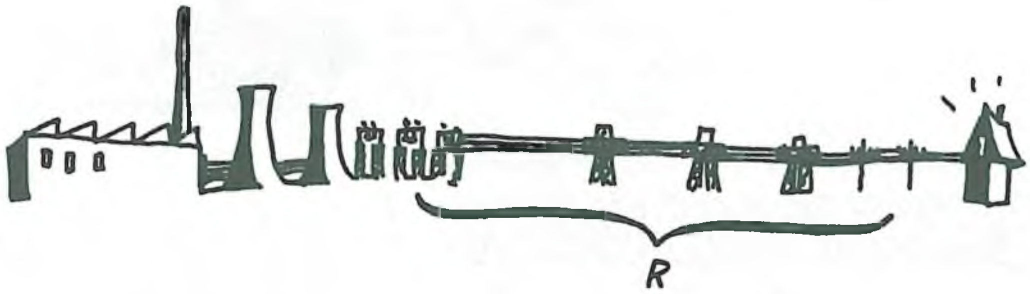
и работает только для переменного тока.

Трансформатор и правда «трансформирует» напряжение, но ничего не дается даром: выходная **МОЩНОСТЬ** на вторичной обмотке не может превышать входную мощность на первичной обмотке. Другими словами, с повышением напряжения уменьшится сила тока.

$$P_{вых} = U_{вых} i_{вых} \leq P_{вх} = U_{вх} i_{вх}$$

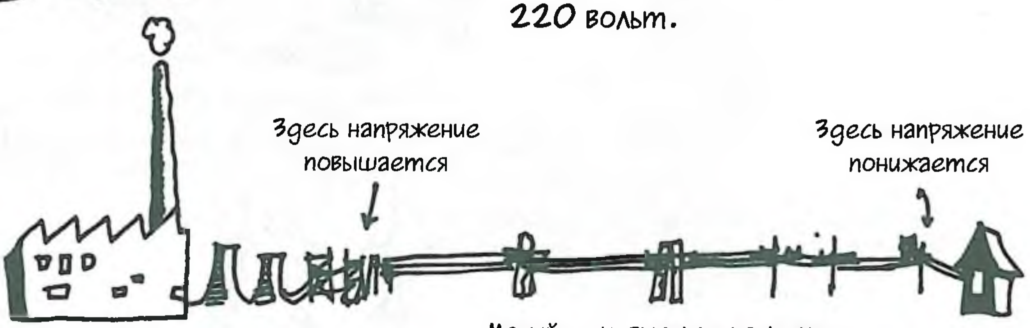
В этом заключается огромное преимущество переменного тока: его напряжение легко меняется.

Это особенно важно при передаче тока от электростанций в дома:



Провода линии электропередачи имеют сопротивление R. Значит, падение напряжения в линии равно $U = IR$, потеря мощности $P = IU = I^2R$. Для больших токов потери мощности огромны.

Напряжение на электростанции повышается до 100 000 вольт и более, сила тока в проводах уменьшается, и потери мощности снижаются. Перед подачей в дома напряжение снижают до сравнительно безопасных 220 вольт.



Скромный трансформатор — основа всей нашей системы электроснабжения.

Возможно, когда появятся высокотемпературные

СВЕРХПРОВОДНИКИ

и более совершенные преобразователи постоянного тока, мы сможем построить линии передачи постоянного тока.

◊ ГЛАВА 23 ◊

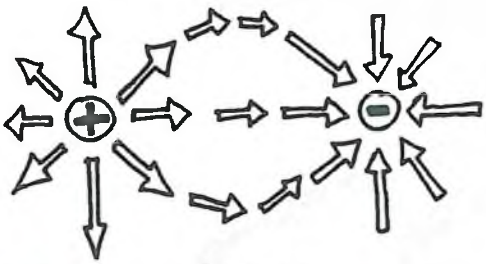
УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА И СВЕТ (и кое-что еще)

Говоря техническим языком, электрическое и магнитное поля — это **ВЕКТОРНЫЕ ПОЛЯ**, которые в каждой точке имеют величину и направление. Чтобы описать векторное поле, нужно указать, как оно расходится, то есть его **ДИВЕРГЕНЦИЮ**, и его завихрение, то есть **РОТОР** (ротор и дивергенция — математические понятия). В 1873 г. Джеймс Клерк

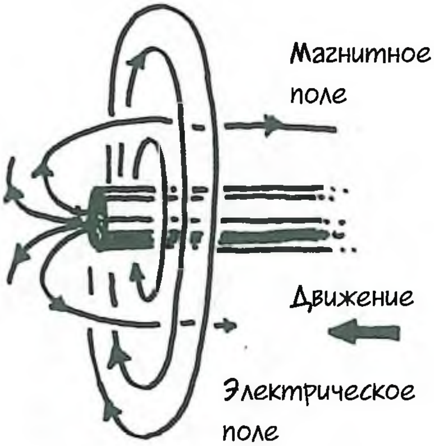
МАКСВЕЛЛ

описал дивергенцию и ротор электрического и магнитного поля в четырех уравнениях.

Первое уравнение Максвелла — это закон Гаусса: силовые линии электрического поля **РАСХОДЯТСЯ** от положительных зарядов и **СХОДЯТСЯ** к отрицательным.

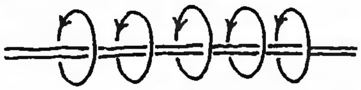


Второе уравнение — это закон Фарадея: силовые линии электрического поля **ЗАВИХРЯЮТСЯ** вокруг изменяющихся магнитных полей. Изменение магнитного поля порождает электрическое поле.



Третье уравнение указывает: силовые линии магнитного поля — это замкнутые кривые, которые не сходятся и не расходятся.

Последнее уравнение указывает, что силовые линии магнитного поля **ЗАВИХРЯЮТСЯ** вокруг проводника с током. Мы уже видели, что магнитное поле образует круги вокруг проводника.



И здесь Максвелла озарило. Его словно пронзило молнией!

Как видишь, уравнения Максвелла выражали уже известные ему законы. Но гениальный Максвелл понял, что закон № 4 — неполный.

Рассмотрим конденсатор в процессе зарядки. На его пластины поступает ток, вокруг провода возникает магнитное поле. А что будет между пластинами?

Здесь нет магнитного поля?

Разве поле резко обрывается между пластинами, где ток останавливается? Максвелл сказал:

Максвелл предположил, что природа не терпит разрывов. Он выдвинул гипотезу: изменение магнитного поля порождает электрическое поле (по Фарадею), значит, изменение электрического поля должно порождать магнитное поле. Доказательств этому не было, но...

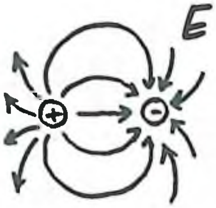
Максвелл дополнил четвертое уравнение и указал, что магнитные поля тоже **ЗАВИХРЯЮТСЯ** вокруг меняющихся электрических полей. Значит, когда электрическое поле нарастает, между пластинами конденсатора возникает магнитное поле.

Это магнитное поле было обнаружено несколько лет спустя.

Не будем церемониться и представим

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

полностью, со всеми великими и ужасными математическими обозначениями!



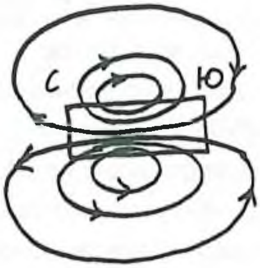
$$\nabla \cdot E = 4\pi\rho$$

(ρ, читается «ро», — плотность заряда, E — электрическое поле) означает: E расходится от положительных зарядов и сходится к отрицательным.

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c}\frac{dB}{dt}$$

(B — магнитное поле)

означает, что E завихряется вокруг меняющихся полей B (c — скорость света).

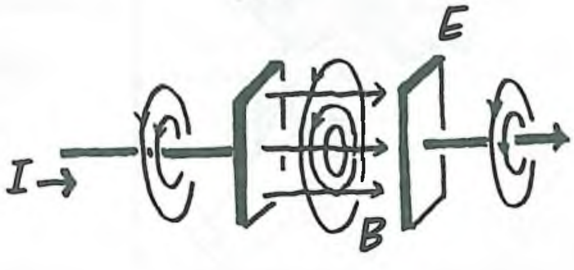


$$\nabla \cdot B = 0$$

указывает, что B никогда не расходится и всегда образует петли.

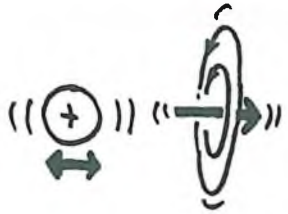
$$\nabla \times B = \frac{4\pi}{c}J + \frac{1}{c}\frac{dE}{dt}$$

означает, что B завихряется вокруг проводников (J — плотность тока) и меняющихся полей E.



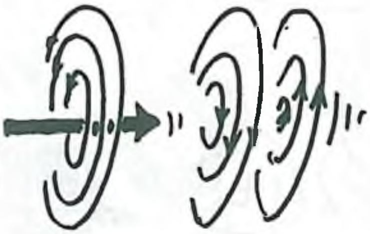
Это небольшое дополнение к четвертому уравнению Максвелла принесло важный и неожиданный результат.

Представь **КОЛЕБАНИЯ** одиночного электрического заряда:



При колебаниях заряда его электрическое поле меняется и порождает магнитное поле, которое завихряется вокруг него.

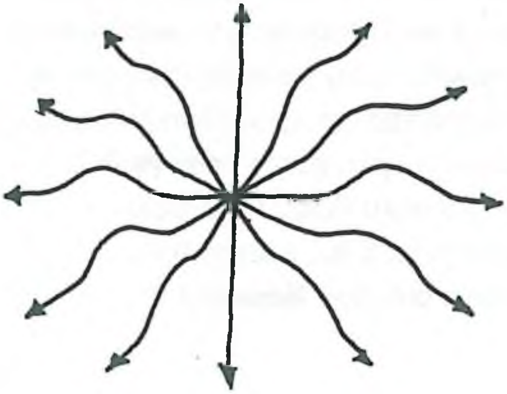
Но магнитное поле тоже меняется, поэтому оно порождает новое электрическое поле, которое порождает новое магнитное поле...



И Т.Д.!

В результате образуется

ВОЛНА



полей, расходящихся в стороны от заряда. По расчетам Максвелла, эта волна распространяется со скоростью света!

Максвелла осенило: он предположил, что сам **СВЕТ** — это **ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА.**

Вскоре Герц и другие ученые смогли получить длинные электромагнитные волны от колеблющихся зарядов и уловить их вдали от источника!

Затем был открыт целый спектр таких волн: радиоволны, микроволны, видимый свет, ультрафиолетовые и инфракрасные лучи, рентгеновские и гамма-лучи. Всего четырьмя уравнениями Максвелл описал электричество, магнетизм, свет и оптику! Неплохо!

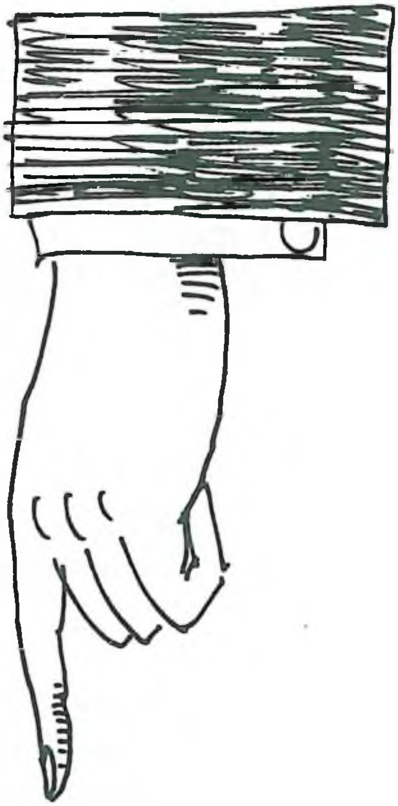
• ГЛАВА 24 •
КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Сейчас мы разберемся,
что такое заряд
на самом деле.

Мы увидели, что электромагнетизм содержит в себе теорию относительности. Если добавить к нему квантовую механику, получится

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА (КЭД).

Сначала стоит сказать несколько слов о квантовой механике — необычной дисциплине, которая используется для описания мира в современной физике. К самым оригинальным ее идеям относятся:



- **СВЕТ** состоит из частиц, не имеющих массы, — **ФОТОНОВ**. Это возможно потому, что частицы могут вести себя как волны.
- Природе присуща **НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ**. Так, нельзя с точностью определить импульс частицы и ее положение одновременно.

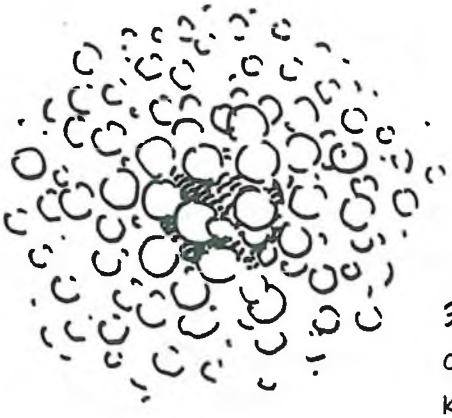
Вернемся к примеру с двумя положительными зарядами, которые отталкиваются друг от друга. Мы не могли понять, как электрическая сила распространяется в пространстве.

В квантовой электродинамике считается, что эта сила возникает благодаря частицам, которые движутся между зарядами. Это частицы света, или **ФОТОНЫ**. Эти фотоны обладают энергией, но не имеют массы, и движутся со скоростью света.

Удивительно, что это не «настоящие» фотоны, которые ты можешь увидеть своими глазами, а **ВИРТУАЛЬНЫЕ** фотоны — частицы-призраки, которые нарушают закон сохранения энергии и существуют ограниченное время.

Эта сила имеет квантовую природу, но ей можно найти аналог в классической механике. Когда заряд испускает фотон, то слегка отскакивает назад. Когда другой заряд улавливает этот фотон, он тоже отскакивает. В результате обмена множеством фотонов возникает сила отталкивания!

А что же эти «виртуальные» фотоны? Облако виртуальных фотонов присутствует даже вокруг одиночного заряда — он постоянно создает, испускает и втягивает виртуальные фотоны.



Это (почти) полное описание с позиций квантовой электродинамики.

* * * * * * * * * *
А электрическое поле — это облако виртуальных фотонов!
* * * * * * * * * *

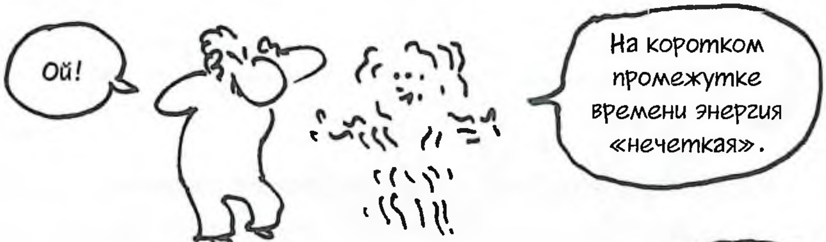
Необычнее всего то, что эти виртуальные фотоны берутся «из ниоткуда». После появления виртуального фотона возрастает совокупная энергия — сумма энергии исходной частицы и энергии фотона.

Здесь в игру вступает принцип неопределенности...

Одна из формулировок

ПРИНЦИПА НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ:

нельзя с точностью определить энергию и время одновременно.



Это значит, что энергетический «баланс» ненадолго может нарушаться. Большой дефицит энергии компенсируется очень быстро, а малый дефицит может некоторое время сохраняться. На языке математики это звучит так:
$\Delta E \cdot \Delta T \geq h$ — произведение дефицита баланса на время его нарушения не может быть меньше определенного малого числа h.

Другими словами, виртуальный фотон с высокой энергией не может уйти далеко даже со скоростью света — его должен поглотить другой заряд, чтобы восстановить энергетический баланс.

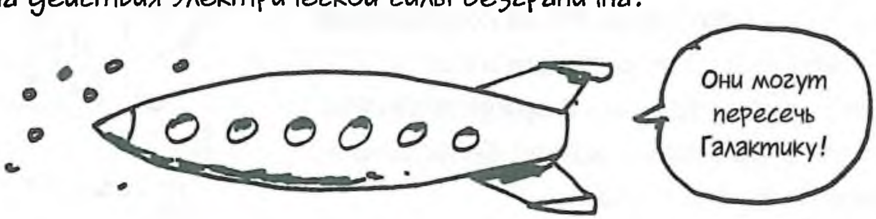
Фотон с низкой энергией может улететь дальше.

Небольшие нарушения баланса могут сохраняться дольше.

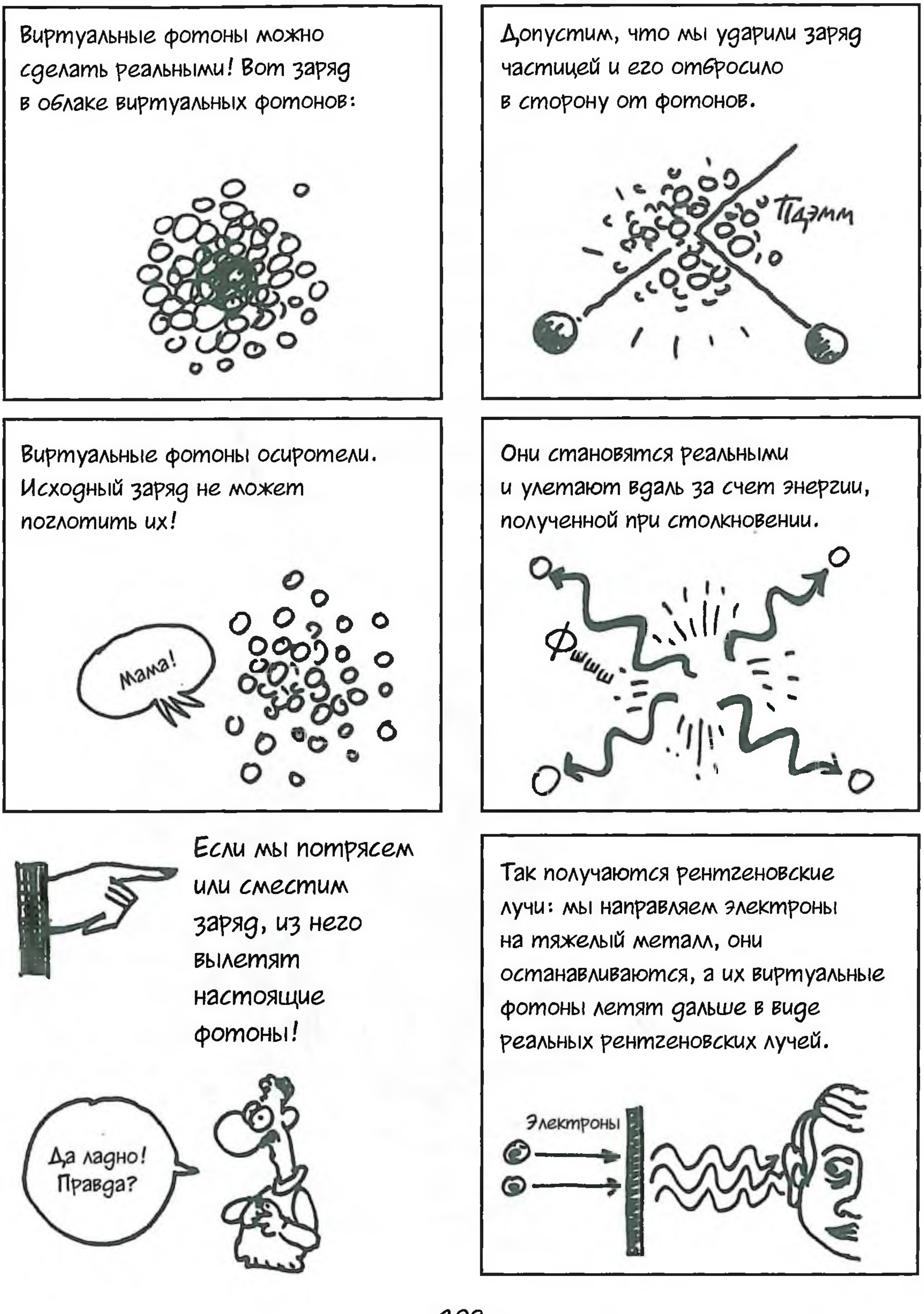
Теперь понятно, почему электрическая сила

ОСЛАБЕВАЕТ НА РАССТОЯНИИ!

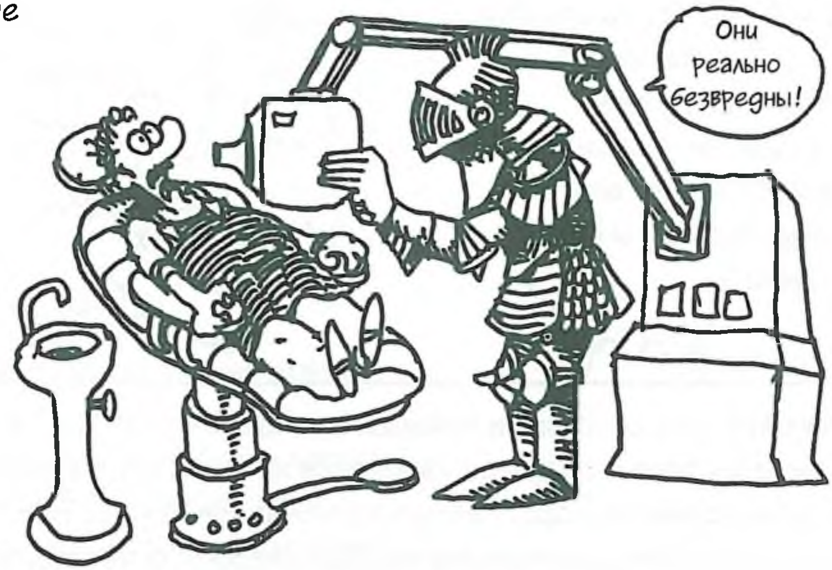
Фотоны с высокой энергией не могут перенести энергию далеко — если мы проведем необходимые расчеты, то получим уже известный нам закон обратных квадратов из классической физики. Но энергия виртуального фотона может быть сколь угодно малой. Фотон с очень низкой энергией может существовать годы и пролететь несколько световых лет. Зона действия электрической силы безгранична!



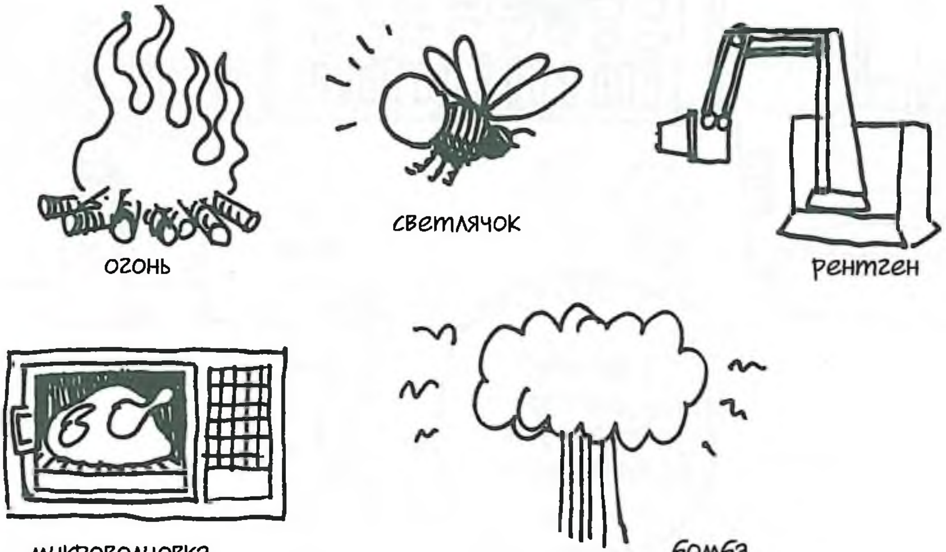
Стой! По этой теории получается, что электрические поля — это облака виртуальных фотонов, но их же не существует! Раз эти фотоны объясняют то, что мы и так знаем, ЗАЧЕМ ОНИ ВООБЩЕ НУЖНЫ? Откуда мы знаем, есть ли они на самом деле?


Виртуальные фотоны можно сделать реальными! Вот заряд в облаке виртуальных фотонов:
Допустим, что мы ударили заряд частицей и его отбросило в сторону от фотонов.
Пдэмм
Виртуальные фотоны осиротели. Исходный заряд не может поглотить их!
Мама!
Они становятся реальными и улетают вдаль за счет энергии, полученной при столкновении.
Фшшш
Если мы потрясем или сместим заряд, из него вылетят настоящие фотоны!
Да ладно! Правда?
Так получаются рентгеновские лучи: мы направляем электроны на тяжелый металл, они останавливаются, а их виртуальные фотоны летят дальше в виде реальных рентгеновских лучей.
Электроны

А рентгеновские лучи реальны!

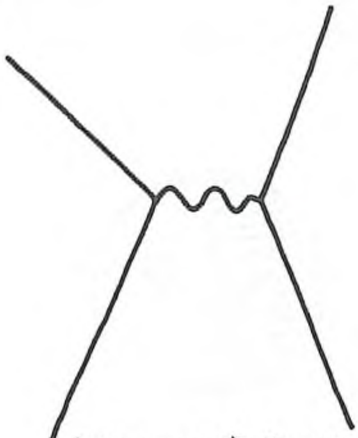


Фотоны — это не обязательно рентгеновские лучи. Например, радиопередатчик жонглирует электронами и стряхивает с них фотоны, а радиоприемник их ловит. Еще один пример — лампочка: электроны в нити накаливания лампы испускают фотоны света. По классической теории, при ускорении заряда излучается электромагнитная волна — это виртуальные фотоны становятся реальными. Именно так фотоны «вытряхиваются» из облаков виртуальных фотонов в большинстве источников излучения вокруг нас:



Если бы квантовая теория описывала только то, что мы уже знаем, она была бы не слишком интересной. Но она предсказывает и новые явления.

Теория «обменных частиц» — переносчиков сил, подобных фотонам, достаточно популярна. Девиз физиков таков:



СИЛЬНОЕ взаимодействие, удерживающее протоны в ядрах атомов, теперь описывается при помощи обмена частиц — **МЕЗОНОВ**. **СЛАБОЕ** взаимодействие удалось объединить с электромагнитным благодаря новым частицам — «братьям» фотонов, которые были сначала описаны теоретически, а уже потом обнаружены.

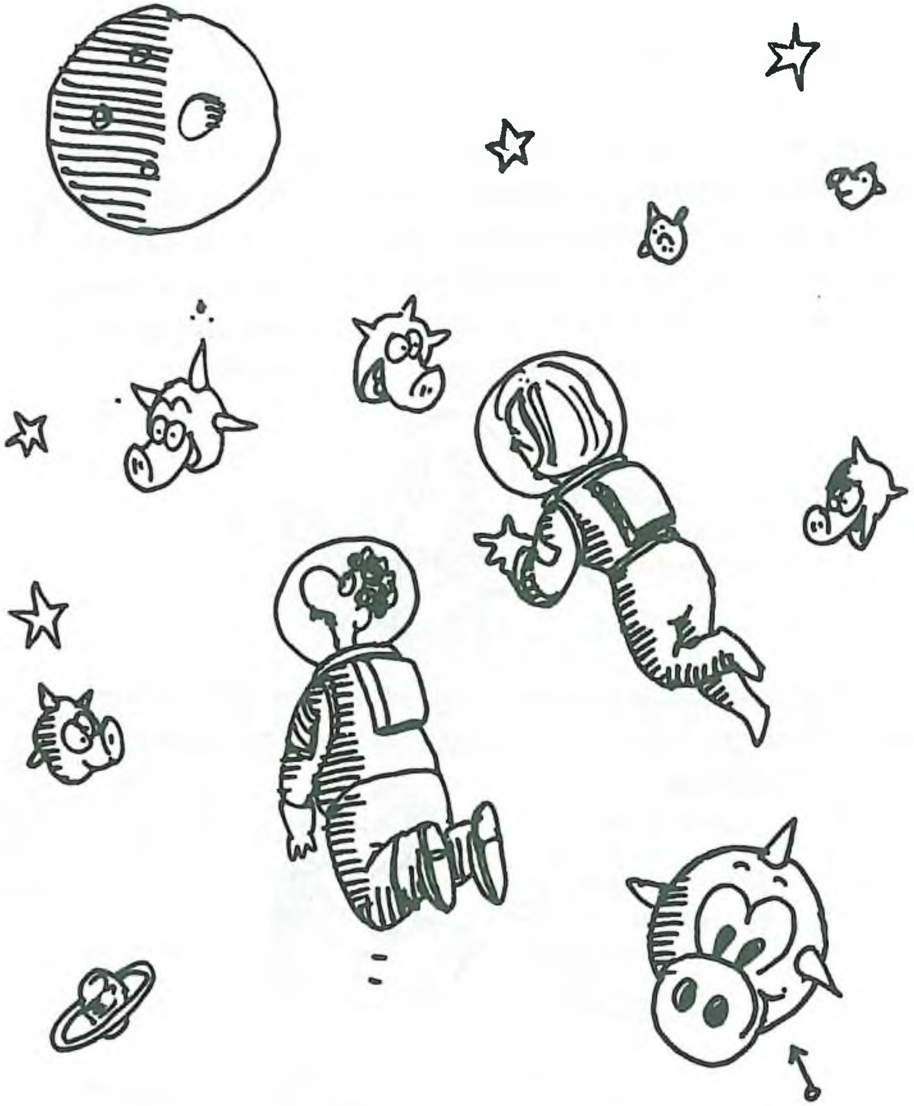
Диаграмма Фейнмана, описывающая обмен частицами

Считается, что взаимодействие между кварками, из которых состоят нейтроны и протоны, объясняется обменом частиц под названием **ГЛЮОНЫ**.

А тяготение?

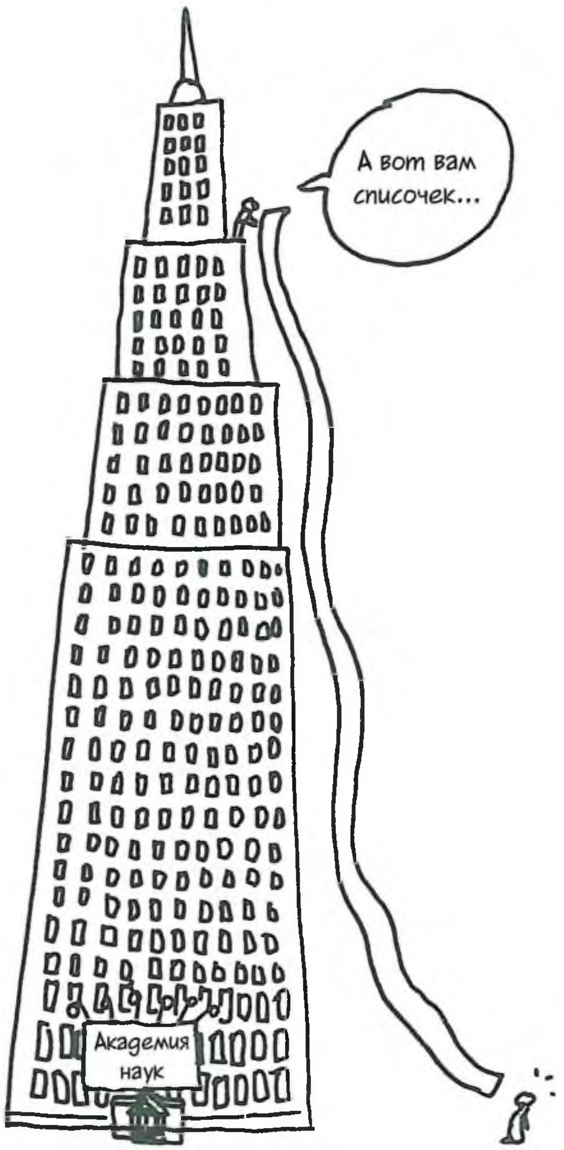
* Клей (англ.).

Ах, тяготение... Оно должно объясняться обменом **ГРАВИТОНОВ**, но их вряд ли удастся обнаружить в ближайшее время, ведь сила тяготения слишком мала. Она ощущается только тогда, когда ее источник — целая планета или Луна. Тем не менее мы уверены: гравитоны существуют.



Гравитон (увеличенный)

Физики по-прежнему верят, что все силы в природе — результат обмена частицами. Найдя связи между этими частицами, мы сможем понять природу всех сил и определить несколько правил, описывающих основы всего мироздания.



Указатель

А

Акселерометр 16, 17, 65
Ампер 136, 137, 142, 146
Ампер, Андре Мари 163
Аристотель 24, 25

Б

Батарея электрическая, изобретение 134
Большой взрыв 88

В

Вакуум 21
Ватт 146, 147
Вес 36, 38, 58, 60
Вес, отличие от массы 37
Взаимодействие
- гравитационное 33
- сильное 68, 211
- слабое 68, 211
- электромагнитное 68
- электростатическое 117, 118

Взрывы 74, 76
Волна электромагнитная 199, 200, 209
Вольт 127, 134, 135
Вольта, Алессандро 121, 134
Вольтметр 144, 145
Вращение 63, 81, 95, 96, 99, 100
Время 19, 21, 72, 182
Вселенная 8, 33, 52, 68, 78, 88, 98, 106, 119, 178
Всемирного тяготения закон 36, 118, 33

Г

Галилей, Галилео 20, 25
Галилея эксперименты 21
Гамма-лучи 120, 200
Гаусса закон 196
Герц, Густав Людвиг 200
Глюоны 211
Гравитоны 212

Д, Ё

Движение 9
- вращательное 97
- круговое 24, 66, 103, 161
- параболическое 39
- прямолинейное 25
- с постоянным ускорением 19

Джоуль 82, 127, 146
Дивергенция 195
Домены 168, 169
Емкость конденсатора 130

З

Заземление 122
Замедление 15
Заряд
- электрический 111
- отрицательный 132, 196, 198
- положительный 113, 124, 132, 196, 198, 203

И

Изоляторы 116
Импульс 71, 85, 93, 94
- конечный 75, 92
- линейный 100
- начальный 92
- общий 75, 76, 78
- силы 72, 73

Импульса сохранение 76, 74
Инерция 28, 37, 65, 66, 188, 189
- вращения 100, 101, 96–98

Ион 113
Искра высоковольтная 185

К

Катушка индуктивности 183, 187–189, 191
Квантовая теория 210
Квантовая механика 202, 204
Квантовая электродинамика 201–203
Кварки 211
Кеплер, Иоганн 51
Кирхгофа правило
- первое 150
- второе 152

Колебания
- электрического заряда 199
- молекул 139

Кольца
- накопительные 161
- токосъемные 187

Компас 156–158, 162, 165, 178
Конденсатор 129–132, 188
Кулон 127

Кулон, Шарль 117
Кулона закон 117

Л

Ленца правило 174
Линии силовые 125
Лучи
гамма 120
инфракрасные 200
рентгеновские 200
ультрафиолетовые 200

М

Магнит 155–157, 161, 162, 166, 170–174, 176, 196
Магнетизм 111, 128, 158, 160, 169, 182, 200, 202
Максвелла уравнения 198, 196
Максвелл, Джеймс Клерк 195, 200
Мезоны 211
Микроволны 200
Момент
импульса 100
силы 99
Мощность
входная 192
выходная 192
Мультиметр 143

Н

Напряжение 143, 144, 147, 149, 150, 153, 154, 191–193
Напряжения падение 150
Небесные тела 24, 32
Невесомость 43
Нейтрон 113, 211
Неопределенности принцип 205
Ньютона закон
первый 27, 31, 41, 46
второй 29, 36, 49, 56, 60, 65, 70, 105
третий 54, 57, 58, 62, 74, 76–78
Ньютон, Исаак 27

О

Обмен частицами 211, 213
Обмотка
первичная 185, 192
вторичная 185, 192
Обратных квадратов закон 34, 51, 206, 210
Ома закон 137, 142, 145, 151–153
Ом, Георг 137
Орбита 43, 44, 46
круговая 48, 55, 66, 81
параболическая 50
эллиптическая 50, 51
Относительности теория 133, 178, 181, 202

П

Падение 20
Парашют 64, 73
Плечо рычага 99
Плоскость наклонная 20, 97
Поле
гравитационное 124
магнитное 157, 160–170, 172, 174, 176–179, 183, 184, 187, 192, 195–199, 210
тяготения 21, 83
электрическое 124–128, 132, 176–178, 195–199, 204
Поля векторные 195
Потенциал 127, 133–135, 137
гравитационный 127
электростатический 127
Правой руки правило 163
Преобразователи постоянного тока 194
Прерыватель 185
Прецессия 102–106
Приливы
квадратурные 35
сизигийные 35
Притяжение тел 33, 55, 68, 118
Проводники 116, 129, 139, 163, 164, 171, 172, 196, 198
Протон 113, 211

Р

Работа 80
Радиоволны 165, 200
Ротор 67

С

Самоиндукция 184
Сверхпроводимость 141
Сверхпроводники 194, 140
Сила 70
гравитационного взаимодействия 33
натяжения 61, 62, 65, 66
результирующая 60
тока 136, 137, 142, 144, 147, 149, 150, 152, 153, 192, 193
трения 26, 57, 60, 63
тяготения 25, 47, 30, 31, 33, 36, 37, 39, 47, 49, 51, 46
центростремительная 66, 67, 161
электродвижущая 171, 172, 184, 185, 188, 192
электростатическая 117
Силы мнимые 65, 67

Скорость
мгновенная 11
орбитальная 45
падения 21, 43
постоянная 10, 14, 17, 18, 20, 27, 31, 59, 60, 81
света 133, 198, 199, 203, 206
средняя 11, 19
угловая 100, 101
Соленоид 164
Сопротивление удельное 139, 140
Сохранения импульса закон 77, 78
Сохранения энергии закон 85, 86, 174, 203, 205
Сплавы 141, 169
Спутники
естественные 44
искусственные 55
Столкновения 89–91
абсолютно упругие 90, 91

Т

Тепло 87
Термодинамика 87
Ток
индукционный 174
переменный 186–189, 191, 192
постоянный 186, 188, 194
электрический 134, 136, 137, 158, 170, 177
Тормоза
магниторельсовые 174
Трансформатор 192
Трение 20, 26, 57, 58, 96
кинематическое 63
о воду 137
о воздух 64
статическое 63
Тяготение 21, 23, 31, 33–36, 41, 43, 76

У

Удар 84, 86, 73
упругий 91
неупругий 91, 92, 94, 95
Уравнения
дифференциальные 50
Ускорение 13–18, 23, 28–30, 36, 37, 39–41, 45, 47, 49, 59, 64, 69, 70, 77, 96, 104
постоянное 19, 21
угловое 96, 104
Ускорители частиц 140, 161

Ф

Фарадей, Майкл 170, 171, 173, 174, 176, 177, 191, 197
Фарадея закон 196
Фейнмана диаграмма 211
Ферромагнетизм 169
Фотон 202–204, 209, 211
виртуальный 203, 206–208
Фотосинтез 88
Франклин, Бенджамин 113

Ч, Э

Частота колебаний
резонансная 190
Эйнштейн, Альберт 47, 176, 181, 182
Электричество 111, 116, 121, 128, 130, 137, 140, 146, 158, 160, 182, 200
Электромагнит 165
Электрон 88, 113–118, 120, 122, 133, 136, 166, 167, 208–210
Электронвольт 133
Электростатического взаимодействия закон 117, 118
Электрофор 121
Энергия 79, 80, 82, 83, 85, 87, 88, 122, 126, 133, 146, 150, 171, 206
кинетическая 83, 91, 94
мышц 88
потенциальная 83, 84, 86, 88, 126, 127
совокупная 204
солнечных лучей 88
химическая 88
Эрстеда эксперимент 162
Эрстед, Ханс 162

ОБ АВТОРАХ

АРТ ХАФФМАН ведет курс лабораторных работ по физике в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе (UCLA). Он также преподает физику и астрономию, организует выезды на астрономические наблюдения, пилотирует самолеты, увлекается скалолазанием и походами. Он защитил кандидатскую диссертацию в Вашингтонском университете и опубликовал ряд статей по теоретической ядерной физике и астрофизике. Семья: жена Линда и двое детей – Таран и Андромеда.

ЛАРРИ ГОНИК – создатель серии нон-фикшн-комиксов, автор рубрики «Классика науки» в журнале DISCOVER. В колледже больше всего проблем ему доставляла именно физика (если не считать его первую девушку), и он искренне благодарен Арту Хаффману за возможность разобраться в предмете. Живет в Сан-Франциско с женой и двумя детьми.

Научно-популярное издание

Ларри Гоник и Арт Хаффман

ФИЗИКА

ЕСТЕСТВЕННАЯ НАУКА В КОМИКСАХ

Редактор Н. Галактионова
Технический редактор Л. Синицына
Корректоры Т. Филиппова, Н. Соколова
Компьютерная верстка И. Лысова

ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус» —
обладатель товарного знака Machaon
119334, Москва, 5-й Донской проезд, д. 15, стр. 4

Филиал ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус» в г. Санкт-Петербурге
191123, Санкт-Петербург, Воскресенская набережная, д. 12, лит. А

ЧП «Издательство «Махаон-Украина»
04073, Киев, Московский проспект, д. 6, 2-й этаж

ЧП «Издательство «Махаон»
61070, Харьков, ул. Ак. Проскуры, д. 1

Знак информационной продукции
(Федеральный закон № 436-ФЗ от 29.12.2010 г.) 12+

Подписано в печать 25.04.2016. Формат 70 x 90 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура «ES Aavar Cyr».
Печать офсетная. Усл. печ. л.
Доп. тираж 3000 экз. B-GNF-16918-03-R. Заказ № 0083/16

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами
в ООО «ИПК Парето-Принт». 170546, Тверская область,
Промышленная зона Боровлево-1, комплекс № 3А
www.pareto-print.ru

ПО ВОПРОСАМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБРАЩАЙТЕСЬ:

В Москве:
ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус»
Тел. (495) 933-76-01, факс (495) 933-76-19
e-mail: sales@atticus-group.ru; info@azbooka-m.ru

В Санкт-Петербурге:
Филиал ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус» в г. Санкт-Петербурге
Тел. (812) 327-04-55
e-mail: trade@azbooka.spb.ru; atticus@azbooka.spb.ru

В Киеве:
ЧП «Издательство «Махаон-Украина»
Тел./факс (044) 490-99-01
e-mail: sale@machaon.kiev.ua

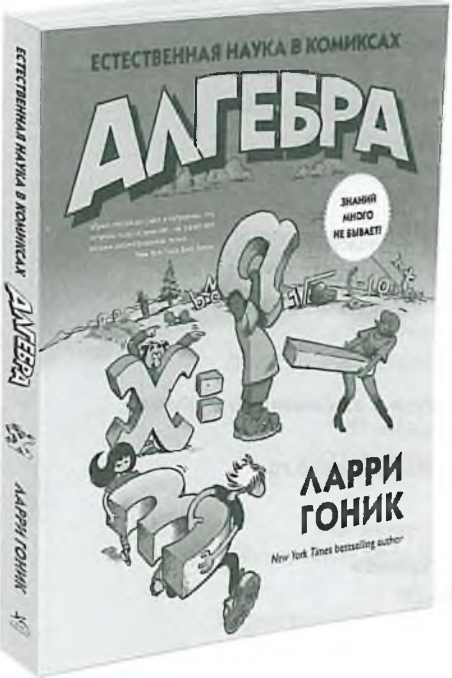
В Харькове:
ЧП «Издательство «Махаон»
Тел. (057) 315-15-64, 315-25-81
e-mail: machaon@machaon.kharkov.ua

www.azbooka.ru; www.atticus-group.ru

ЕСТЕСТВЕННАЯ НАУКА В КОМИКСАХ

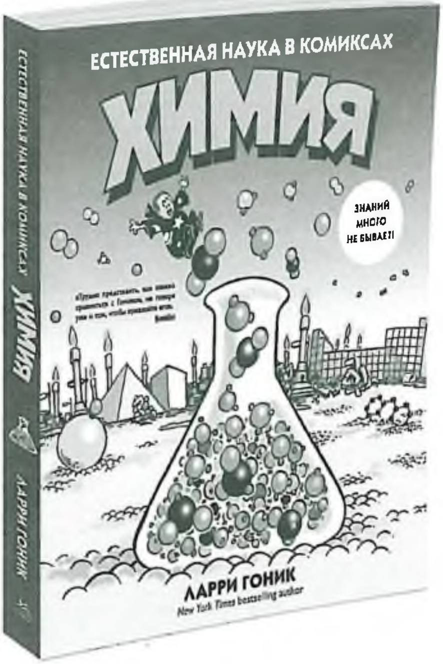
ЕЩЕ НИКОГДА О СЛОЖНОМ НЕ ГОВОРИЛОСЬ ТАК КРАТКО, ДОХОДЧИВО И НЕПРИНУЖДЕННО

Интенсивный курс алгебры, написанный в безупречно ясном, структурированном виде, охватывающий ряд основных тем школьной программы, включая линейные уравнения, многочлены, квадратные уравнения, построение кривых. С живым юмором автор делает экскурс в историю алгебры и приводит многочисленные примеры практического применения «царицы наук» в современной жизни.



WWW.AZBOOKA.RU

ЕСТЕСТВЕННАЯ НАУКА В КОМИКСАХ

ЕЩЕ НИКОГДА О СЛОЖНОМ НЕ ГОВОРИЛОСЬ ТАК КРАТКО, ДОХОДЧИВО И НЕПРИНУЖДЕННО

Эта замечательная книга с остроумными иллюстрациями дает представление об истории химии, знакомит с атомной теорией вещества, затрагивает важнейшие темы из областей физической и органической химии, биохимии, химии окружающей среды, электрохимии и других.